作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2023, 49(5): 1292–1304 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.23046

基于夏玉米产量和氮素利用的水氮减量方案优选

李 慧 王旭敏 刘 苗 刘朋召 李巧丽 王小利 王 瑞 李 军*

[1] 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; [2] 农业农村部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100

摘 要: 针对当前夏玉米生产中水氮投入不合理, 缺少综合夏玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量对水氮优化管理模式评价的问题, 运用层次分析法、熵权法、博弈论组合赋权计算各指标权重, 使用 TOPSIS 法建立模型对水氮减量方案进行综合评价, 为关中平原夏玉米节水节肥环保增效的生产模式提供理论依据。于 2018—2020 年在陕西杨凌开展水、氮二因素裂区田间试验。设置 3 个灌溉处理, 以传统灌水量(800 m^3 hm^{-2}, W2)为对照、在此基础上减 50% (400 m^3 hm^{-2}, W1)和减 100% (0 m^3 hm^{-2}, W0)。每个灌溉量下设 5 个施氮梯度, 以传统施氮量(300 kg hm^{-2}, N300)为对照、在此基础上减 25% (225 kg hm^{-2}, N225)、减 50% (150 kg hm^{-2}, N150)、减 75% (75 kg hm^{-2}, N75)和减 100% (0)。分析不同水氮减量处理夏玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量, 使用 TOPSIS 法建模选优。与对照 W2N300 相比, W1N225 增产效果最明显, 增产率为 5.4%, W2N225、W2N150、W1N150 也表现出明显的增产效应, 增产率分别为 2.4%、0.7%、0.3%。W1N225、W1N150 可以显著提高氮肥农学效率、氮肥回收效率、氮肥偏生产力, 2018 年 NAE、NRE、NPFP 分别比传统模式提高 29.7%、16.2%、24.5%, 36.5%、25.4%、28.8%; 2019 年分别提高 53.4%、36.7%、32.8%, 46.5%、35.2%、47.4%; 2020 年分别提高 43.6%、37.3%、48.0%, 66.9%、43.1%、54.5%。W1N225、W1N150 土壤硝态氮残留量比传统水氮管理模式减少 28.6%、53.8%。使用 TOPSIS 法进行综合评价, 发现氮肥减量 25%~50%、灌水减少 50%时各指标评价值最高, 水氮减量(中水中肥)优于高水高肥, 高水高肥优于低水低肥, 高水低肥优于低水高肥。通过 TOPSIS 法模拟寻优得出灌水量为 W1 (400 m^3 hm^{-2})施氮量为 200 kg hm^{-2} 时综合评价值最优。因此, 在关中平原灌溉区, 灌水减量 50% (400 m^3 hm^{-2})、施氮减少 33.3% (200 kg hm^{-2})可以实现关中平原夏玉米生产节水减肥环保增效的目标。

关键词: 夏玉米; 水氮减量; 氮素利用; 产量; TOPSIS 法

Water and nitrogen reduction scheme optimization based on yield and nitrogen utilization of summer maize

LI Hui, WANG Xu-Min, LIU Miao, LIU Peng-Zhao, LI Qiao-Li, WANG Xiao-Li, WANG Rui, and LI Jun*

[1] College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; [2] Key Laboratory of Crop Physio-ecology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, Shaanxi, China

Abstract: The objective of this study is to solve the problems of excessive water and nitrogen input in current summer maize cropping system and lacking comprehensive evaluation approach and evaluate the current water and nitrogen management scheme for yield, nitrogen utilization of summer maize and soil nitrate nitrogen content. AHP, entropy method, and game theory were combined to determine index weight, TOPSIS was used to evaluate water and nitrogen reduction scheme, thus the results can provide a theoretical basis for water-saving, nitrogen-reducing and high efficient cultivation scheme of summer maize in Guanzhong plain. The two-factor split-plot field experiment during 2018–2020 was conducted in Yangling, Shaanxi province, where

本研究由国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02)和国家自然科学基金项目(31801300)资助。

The study was supported by the National Science and Technology Support Program of China (2015BAD22B02) and the National Natural Science Foundation of China (31801300).

* 通信作者(Corresponding author): 李军, E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 17852021052@163.com

Received (收稿日期): 2022-06-01; Accepted (接受日期): 2022-09-05; Published online (网络出版日期): 2022-09-17.

URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20220916.1121.004.html

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

three irrigation levels were traditional 800 m^3 hm^{-2} (W2) as the control, reduced to 400 m^3 hm^{-2} (W1), and no irrigation (W0). Each water treatment was the five N rate treatments [300 kg hm^{-2} (N300) as the control, reduced 25% (225 kg hm^{-2}), reduced 50% (150 kg hm^{-2}), reduced 75% (75 kg hm^{-2}), and no N fertilizer (0)]. Maize yield, nitrogen use efficiency, and soil nitrate nitrogen content under different water and nitrogen reduction treatments were analyzed and to choose optimal scheme with modeling by TOPSIS. Compared with W2N300 (CK), W1N225 had best effect on yield, and increased significantly by 5.4%. Meanwhile, W2N225, W2N150, and W1N150 had significantly effect on yield, and increased significantly by 2.4%, 0.7%, and 0.3%, respectively. W1N225 and W1N150 enhanced the N-use efficiency, agronomic efficiency, and partial factor productivity, and increased significantly by 29.7%, 16.2%, 24.5%; 36.5%, 25.4%, 28.8%; 53.4%, 36.7%, 32.8%; 46.5%, 35.2%, 47.4%; 43.6%, 37.3%, 48.0%; and 66.9%, 43.1%, 54.5% than CK in 2018, 2019, 2020, respectively. W1N225, W1N150 reduced soil nitrate nitrogen leaching, and decreased by 28.6% and 53.8% than CK, respectively. Using TOPSIS for comprehensive evaluation, it was found that the evaluation value of each index was the highest when nitrogen fertilizer was reduced by 25%–50% (with nitrogen application rate of 150–225 kg hm^{-2}) and irrigation water was reduced by 50% (irrigated 400 m^3 hm^{-2} in jointing stage). Water and nitrogen reduction (medium fertilizer in middle water) were better than high water and high fertilizer, high water and high fertilizer were better than low water and low fertilizer, and high water and low fertilizer were better than low water and high fertilizer. Through TOPSIS optimization, the comprehensive evaluation value was the best when the irrigation amount was W1 (irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage) and the nitrogen application amount was 200 kg hm^{-2}. Therefore, reduced irrigation (irrigated 400 m^3 hm^{-2} in jointing stage) and reduced 33.3% nitrogen (with nitrogen application rate of 200 kg hm^{-2}) mode can be used to realize the water-saving and nitrogen reduction production of summer maize in Guanzhong Plain.

Keywords: summer maize; irrigation and nitrogen fertilizer reduction; nitrogen use efficiency; yield; technique for order preference by similarity to an ideal solution

施氮和灌溉是促进作物生长发育和产量提高的重要途径[1]。我国纯氮施用量在逐年上升，平均每年增加约 7.8×10^5 t [2]，关中地区农田平均施氮量高达 (288±113) kg hm^{-2} [3]，过量氮肥投入导致氮肥利用效率降低，使得我国农作物氮肥利用率平均只有 28%~41%，远低于 40%~60%的世界平均水平[4-5]。我国农业水资源供需矛盾日益明显，关中地区灌溉水资源短缺严重[6]，节约农业灌溉用水也是亟待解决的重要问题。目前不合理的农业生产方式，不仅降低了水肥利用效率，而且引发了环境污染等一系列问题[7-8]。解决玉米栽培中水氮过量投入、资源浪费突出的问题，有助于实现我国农业从以“增产为核心”的单一目标向“可持续发展的高产高效、环境友好”多重目标转变[9]。

农田水氮存在明显的交互效应[10]，水氮互作可显著提高玉米产量，其中氮为主效[11]，科学的水肥管理可以有效促进水氮耦合效应[12]。前人研究表明，减氮条件下适量滴灌有利于提高氮肥吸收利用率，充分发挥水氮协同和耦合效应，弥补减氮带来的产量损失，川中丘陵地区纯氮 180 kg hm^{-2}、滴灌 750~1125 m^3 hm^{-2} [13]有利于促进玉米生长，提高产量和氮素利用。在关中平原，与常规施氮 300 kg hm^{-2}、灌溉 800 m^3 hm^{-2} 相比，适宜减少施氮和灌水不会造成产量减少[14]。控释氮肥减量 25%可使玉米小幅度增产，且氮素利用效率显著提高[15]。黄土高原旱地玉米连作农田单施氮肥 180 kg hm^{-2} 处理下，23 年后 0~300 cm 土层硝态氮残留量高达 1500 kg hm^{-2} [16]。渭北旱地春玉米施氮量高于 180 kg hm^{-2}，0~200 cm 土层硝态氮残留量高达 504.7~620.8 kg hm^{-2}，存在氮素淋溶风险[17]。

在传统水肥管理模式基础上适宜的水氮减量，可以有效提高玉米水肥资源利用效率，减少硝态氮淋溶风险[7]。前人已经在灌水和施氮单一因素对玉米产量、氮素利用和硝态氮积累等方面开展了相关研究[18-22]，但相关研究多为单因素回归分析，适用于指标较少的情况，不利于多指标判定，夏玉米产量、氮素利用、土壤硝态氮含量各指标衡量标准不尽相同，但却相互影响。因此本研究通过 3 年夏玉米田间定位灌溉和施氮试验，分析水氮共同减量处理下水氮互作对玉米产量、氮素利用和土壤硝态氮的影响，运用层次分析法[23]、熵权法[24]、博弈论组合赋权[25]得到各指标综合权重，并通过 TOPSIS 法[26]建模综合选优，旨在达到水氮量化管理，以期为关中平原夏玉米发展高产、高效、节水、节肥、环保的生产模式提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

于 2018—2020 年在陕西省杨凌区西北农林科技大学曹新庄试验农场(34°20′N, 108°07′E)实施。当地属于大陆性季风暖温带半湿润气候，年均日照时数 2163.8 h，年均气温 12.9℃，年均降水量 635.1 mm，年均蒸发量 993.2 mm，无霜期 211 d，供试土壤为壤土。试验地种植制度为冬小麦、夏玉米一年二熟制

轮作, 试验开始前土壤养分见表 1。2018—2020 年夏玉米均为 6 月 14 日播种, 2018 年为 10 月 1 日收获, 2019 年和 2020 年为 9 月 30 日收获, 生育期内降水量分别为 335.3、499.8 和 508.9 mm, 2018 年和 2020 年生育前期降水较密集, 2019 年生育后期降水较密集(图 1)。

表 1 试验地 0~60 cm 土层基础理化性状

Table 1 Basic physicochemical properties of the experiment soil (0–60 cm)

土层 Depth (cm)	有机质 SOM (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	硝态氮 Nitrate N (mg kg^{-1})	全磷 Total P (g kg^{-1})	速效磷 Available P (mg kg^{-1})	全钾 Total K (g kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})	容重 Soil bulk density (g cm^{-3})
0–20	19.06	1.24	12.46	0.99	27.59	10.85	243.87	1.20
20–40	15.03	1.00	14.53	0.86	15.06	10.59	222.31	1.38
40–60	10.95	0.79	23.08	0.62	3.54	9.90	193.96	1.49

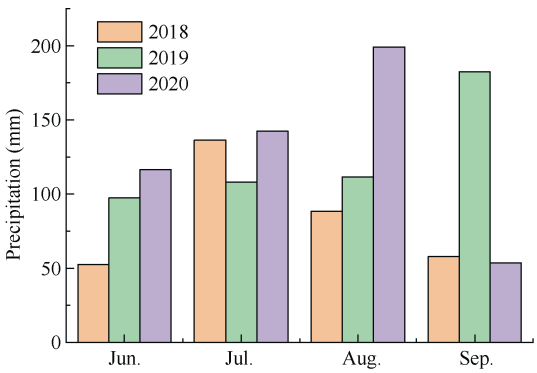


图 1 夏玉米生长季月降雨量

Fig. 1 Monthly rainfall during the growth period of summer maize

1.2 试验设计

采用二因素裂区设计, 灌溉量为主区, 施氮量为副区。灌溉量设 3 个灌溉水平: 传统灌水量(800 m^3 hm^{-2}, W2)为对照, 于拔节期和抽雄期各灌溉 400 m^3 hm^{-2}; 减量 50% (400 m^3 hm^{-2}, W1), 于拔节期进行; 不灌溉(W0)。施氮量设 5 个施氮水平: 传统施氮量(300 kg hm^{-2}, N300)为对照、减施 25% (225 kg hm^{-2}, N225)、减施 50% (150 kg hm^{-2}, N150)、减施 75% (75 kg hm^{-2}, N75)和不施氮(N0)。小区面积 91 m^2 (6.5 m×14.0 m), 3 次重复, 共计 45 个小区。施用氮肥为尿素, 试验地统一施磷肥为 P_2O_5 120 kg hm^{-2}, 本地区农田土壤富含钾素, 因此本试验不施钾肥, 氮、磷肥全部基施。供试玉米品种为郑单 958, 密度 6×10^4 株 hm^{-2}。灌溉方式采用喷灌, 水表控制灌水量, 其他管理措施同当地生产习惯。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 *产量及产量构成因素* 在玉米成熟期, 每个小区选取行长 5 m 长势均匀的玉米各 3 行, 统计穗数, 在行内选取 20 个均匀果穗, 取 3 次重复, 风干后于室内考种, 测定穗粒数和百粒重, 按 14%含水量折算籽粒产量。

1.3.2 *植株样品* 于夏玉米成熟期, 采集不同处理具有代表性玉米植株 3 株, 取其地上部分 105℃杀青 30 min, 85℃烘干至恒重后称重并粉碎, 采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮, 凯氏定氮法测定全氮含量[27]。

1.3.3 *土壤硝态氮* 在 2018 和 2019 年夏玉米成熟期, 用土钻采集 0~200 cm、2020 年采集 0~300 cm 土层土样, 每 20 cm 为一个土层。将待测土样过 2 mm 筛, 称取 5.0 g 鲜土样, 用 50 mL 1 mol L^{-1} KCl 溶液浸提, 振荡 1 h 后过滤, 用连续流动分析仪(AA3 型)测定硝态氮含量。

1.3.4 *权重确定* 由于产量、氮素利用和土壤硝态氮含量评价指标各不相同, 相互之间无法直接比较, 为消除量纲不同的影响, 先对数据进行归一化处理, 再利用不同方法确定各指标所占权重, 运用层次分析法[20]进行主观层次分析, 利用熵权法[21]进行客观权重分析, 由于二者之间存在差异, 运用博弈论组合赋权[22]获得最终权重。

1.3.5 *测定项目相关计算方法*[16] 收获指数 = 籽粒产量/地上部生物量; 氮肥农学效率(NAE, kg kg^{-1}) = (施氮区玉米产量–不施氮区玉米产量)/施氮量; 氮肥回收效率 (NRE, %) = (施氮区植株地上部氮积累量–不施氮区植株地上部氮积累量)/施氮量 × 100; 氮肥偏生产力(NPFP, kg kg^{-1}) = 施氮区籽粒产量/施氮量; 每一土层硝态氮残留量(NR, kg hm^{-2}) = 土壤硝态氮含量(mg kg^{-1}) ×土层厚度(cm) × 土壤容重(g cm^{-1})/10。一定深度土壤硝态氮残留总量为各个土层硝态氮残留量之和。

1.4 数据分析

使用 SPSS19.0 分析试验数据, 采用 Duncan's 法多重比较, 差异显著性水平 P<0.05。使用 Origin 2018、2021 制图。

2　结果与分析

2.1　不同水氮减量处理对夏玉米产量的影响

由表 2 可知, 3 年试验期间, 除 2019 年外, 施氮量和灌水量及其互作对夏玉米产量有显著影响。试验结果表明, 在同一灌水水平下, 随施氮量的减少, 产量总体呈现先增后降的趋势, N225 优于其他处理。在同一施氮水平下, W1 和 W2 产量差异不显著, 但都与 W0 差异显著, 与 W2 相比, 3 年平均产量 W0 减少 13.6%。在不同水氮处理下, 与 W2N300 相比, 2018 年 W2N225 产量最高, 增高 2.1%, 2019、2020 年 W1N225 与 W1N300 产量最高, 分别增高 5.0%、5.5%, 10.5%、8.8%。连续 3 年田间试验显示, 与对照 W2N300 相比, W2N225、W2N150、W1N300、W1N225、W1N150 增产 2.4%、0.7%、4.5%、5.4%、0.3%, 其中 W1N225 增产最高。

2.2　不同水氮减量处理对夏玉米氮素吸收利用的影响

由表 3 可知, 施氮量和灌水量及其互作对夏玉米地上部吸氮量有极显著影响。总体来说, 在同一灌水水平下, 随施氮量的减少, 2018 年和 2019 年氮素吸收呈减小趋势, 2020 年则是先增后减, 但 N225 和 N300 无显著差异。由此说明, 植株吸氮量存在阈值, 超过阈值继续增施氮肥不会改善作物生长潜力。在同一施氮水平下, 植株吸氮量随灌水量的减少而减少, 与 W2 相比, 2018 年和 2019 年植株吸氮量 W1 和 W0 减少 6.8%、21.0%和 12.1%、17.8%, 2020 年 W1 与 W2 则无显著差异, 由此说明, 同一施氮下 W2 需要更多的氮肥供应。施氮和灌水对氮肥农学效

表 2　不同水氮减量处理下夏玉米产量
Table 2　Maize yield under different water and nitrogen reduction treatments

处理 Treatment	产量 Yield (kg hm^{-2})			平均 Mean	增产率 Increase rate (%)
	2018	2019	2020		
W2N300	9802.0 b	9925.9 b	9435.7 c	9722.4 c	—
W2N225	10,016.0 a	9982.2 b	9867.4 b	9955.2 b	2.4 b
W2N150	9707.4 b	9664.0 c	10,014.0 b	9795.2 bc	0.7 c
W2N75	8612.3 d	9259.0 d	8955.8 e	8942.4 d	–8.0 e
W2N0	7322.7 f	6891.2 i	7823.2 h	7345.5 g	–24.4 i
W1N300	9619.5 b	10,508.0 a	10,347.7 a	10,158.4 a	4.5 a
W1N225	9729.4 b	10,451.2 a	10,543.9 a	10,244.8 a	5.4 a
W1N150	9358.6 c	9556.1 c	10,377.4 a	9753.0 c	0.3 d
W1N75	8652.3 d	8705.2 e	9254.1 d	8870.5 d	–8.8 f
W1N0	7065.4 g	6865.3 i	7927.0 h	7285.9 g	–25.1 j
W0N300	8257.1 e	8444.3 g	8761.1 f	8487.5 e	–12.7 g
W0N225	8107.3 e	8675.6 ef	8966.3 e	8583.4 e	–11.7 g
W0N150	8045.1 e	8481.5 fg	9112.5 de	8546.4 e	–12.1 g
W0N75	7422.3 f	7871.1 h	8148.7 g	7814.0 f	–19.6 h
W0N0	6160.6 h	5251.9 j	6932.6 i	6114.7 h	–37.1 k
方差分析 ANOVA					
W	***	***	**	***	***
N	***	*	***	***	***
W×N	**	NS	*	***	***

N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2}; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2}; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2}; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2}; N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2}; W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水; –: 产量减少; W: 灌水量; N: 施氮量; W×N: 灌水量×施氮量。同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。NS 表示无显著差异, *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。

N300: nitrogen application rate was 300 kg hm^{-2}; N225: nitrogen application rate was 225 kg hm^{-2}; N150: nitrogen application rate was 150 kg hm^{-2}; N75: nitrogen application rate was 75 kg hm^{-2}; N0: no nitrogen application; W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} in jointing and tasseling stage; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} in jointing stage; W0: no irrigation; –: yield reduction. W: irrigation amount; N: nitrogen application; W×N: irrigation × nitrogen. Values followed by different lowercase letters within a column indicate significant difference among treatments in the same year at $P < 0.05$. NS: not significant. *, **, and *** indicate significant difference at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

表 3 不同水氮减量处理下夏玉米地上部吸氮量和氮素利用效率

Table 3 Aboveground nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of summer maize under different water and nitrogen reduction treatments

处理 Treatment	2018				2019				2020			
	N uptake (kg hm^{-2})	NAE (kg kg^{-1})	NRE (%)	NPFP (kg kg^{-1})	N uptake (kg hm^{-2})	NAE (kg kg^{-1})	NRE (%)	NPFP (kg kg^{-1})	N uptake (kg hm^{-2})	NAE (kg kg^{-1})	NRE (%)	NPFP (kg kg^{-1})
W2N300	227.5 a	8.3 e	30.6 f	32.7 g	213.7 a	10.1 f	24.9 f	33.1 h	191.6 a	5.4 f	24.8 f	31.5 hi
W2N225	221.8 a	12.0 d	38.2 de	44.5 e	213.0 a	13.7 de	32.9 e	44.4 f	193.0 a	9.1 d	33.7 e	43.9 g
W2N150	201.9 b	15.9 b	44.0 c	64.7 c	213.2 a	18.5 bc	49.5 b	64.4 d	172.2 b	14.6 b	36.7 de	66.8 d
W2N75	169.3 e	17.2 b	44.6 c	114.8 a	168.7 e	18.2 bc	45.0 c	123.5 a	155.2 c	15.1 b	50.9 b	119.4 b
W2N0	135.8 i	—	—	—	139.0 i	—	—	—	117.0 f	—	—	—
W1N300	202.9 b	8.5 e	28.6 f	32.1 g	190.6 b	12.1 ef	24.3 f	35.0 h	191.6 a	8.1 de	26.3 f	34.5 h
W1N225	199.3 b	11.8 d	36.5 e	43.3 e	192.7 b	15.9 cd	33.4 e	46.5 f	196.6 a	11.6 c	39.2 d	46.9 f
W1N150	188.1 c	15.5 bc	47.2 c	62.2 c	177.2 c	17.9 bc	39.7 d	63.7 d	173.9 b	16.3 ab	43.6 c	69.2 d
W1N75	183.8 d	21.2 a	88.8 a	115.4 a	154.4 h	24.5 a	49.0 b	116.1 b	150.4 cd	17.7 a	56.0 a	123.4 a
W1N0	117.2 j	—	—	—	117.7 j	—	—	—	108.4 fg	—	—	—
W0N300	158.8 g	7.0 e	19.0 g	27.5 h	177.1 c	9.6 f	24.2 f	28.2 i	143.7 d	6.1 ef	13.8 g	29.2 i
W0N225	182.6 d	8.7 e	35.9 e	36.0 f	172.5 d	13.9 de	30.2 e	38.6 g	154.9 c	9.0 d	23.3 f	39.9 g
W0N150	162.0 f	12.6 cd	40.1 d	53.6 d	164.5 f	19.5 b	40.0 d	56.5 e	141.5 d	14.5 b	26.1 f	60.8 e
W0N75	150.6 h	16.8 b	65.0 b	99.0 b	160.3 g	22.9 a	74.4 a	105.0 c	129.7 e	16.2 ab	36.4 de	108.6 c
W0N0	101.8 k	—	—	—	104.5 k	—	—	—	102.4 g	—	—	—
W	***	**	***	***	***	*	***	***	***	**	***	**
N	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
W×N	**	NS	***	***	***	NS	***	***	***	NS	NS	NS

N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2}; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2}; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2}; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2}; N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2}; W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水; W: 灌水量; N: 施氮量; W×N: 灌水量×施氮量; N uptake: 夏玉米地上部吸氮量; NAE: 氮肥农学效率; NRE: 氮肥回收效率; NPFP: 氮肥偏生产力。同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。NS 表示无显著差异, *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。

N300: nitrogen application rate was 300 kg hm^{-2}; N225: nitrogen application rate was 225 kg hm^{-2}; N150: nitrogen application rate was 150 kg hm^{-2}; N75: nitrogen application rate was 75 kg hm^{-2}; 0: no nitrogen application; W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} at jointing and tasseling stages; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation; W: irrigation amount; N: nitrogen application; W×N: irrigation × nitrogen, N uptake: aboveground nitrogen uptake of summer maize; NAE: nitrogen agronomic efficiency; NRE: nitrogen recovery efficiency; NFPF: N partial factor productivity. Values followed by different lowercase letters within a column indicate significant difference among treatments in the same year at $P < 0.05$. NS: not significant. *, **, and *** indicate significant difference at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

率、氮肥回收率、氮肥偏生产力具有显著影响。在同一灌水水平下, 随施氮量的减少, NAE、NRE、NPFP 都呈增加趋势。在同一施氮量下, NAE 随灌水量的减少呈先增后降的趋势, 与 W2 相比, 2018、2019、2020 年 W1 分别增大 6.3%、14.1%、17.7%。2018、2020 年 NRE 随灌水量的减少呈先增后降, 2019 年则是随施氮量的减少呈现先降后增的趋势。2018、2019、2020 年 NPFP 在 W1、W2 无显著差异, 与 W0 差异显著。不同水氮处理下, 与 W2N300 相比, W2N225、W2N150、W1N225、W1N150 在 2018 年 NAE、NRE、NPFP 分别提高 30.8%、19.9%、26.5%, 26.3%、24.3%、25.5%, 40.7%、26.4%、28.2%, 40.8%、30.5%、49.5%; 2019 年分别提高 45.4%、49.7%、48.6%, 63.0%、32.4%、52.8%, 29.7%、16.2%、24.5%, 36.5%、25.4%、28.8%, 2020 年分别提高 53.4%、36.7%、32.8%, 46.5%、35.2%、47.4%, 43.6%、37.3%、48.0%和 66.9%、43.1%、54.5%。

2.3 不同水氮减量处理对土壤硝态氮含量及其残留的影响

由图 2 可知, 在同一灌水水平下, 随施氮量减少, 夏玉米田 0~200 cm、0~300 cm 土层土壤硝态氮含量呈递减趋势, 与 N300 相比, N75、N0 硝态氮含量始终处于相对较低的水平, N300 累积峰含量大约为 50.2 mg kg^{-1}。从灌水量看, W2、W1 土壤硝态氮含量随土层的加深逐渐增大, W0 则逐渐减小。2018—2019 年 0~60 cm 土层中硝态氮含量 W0 和

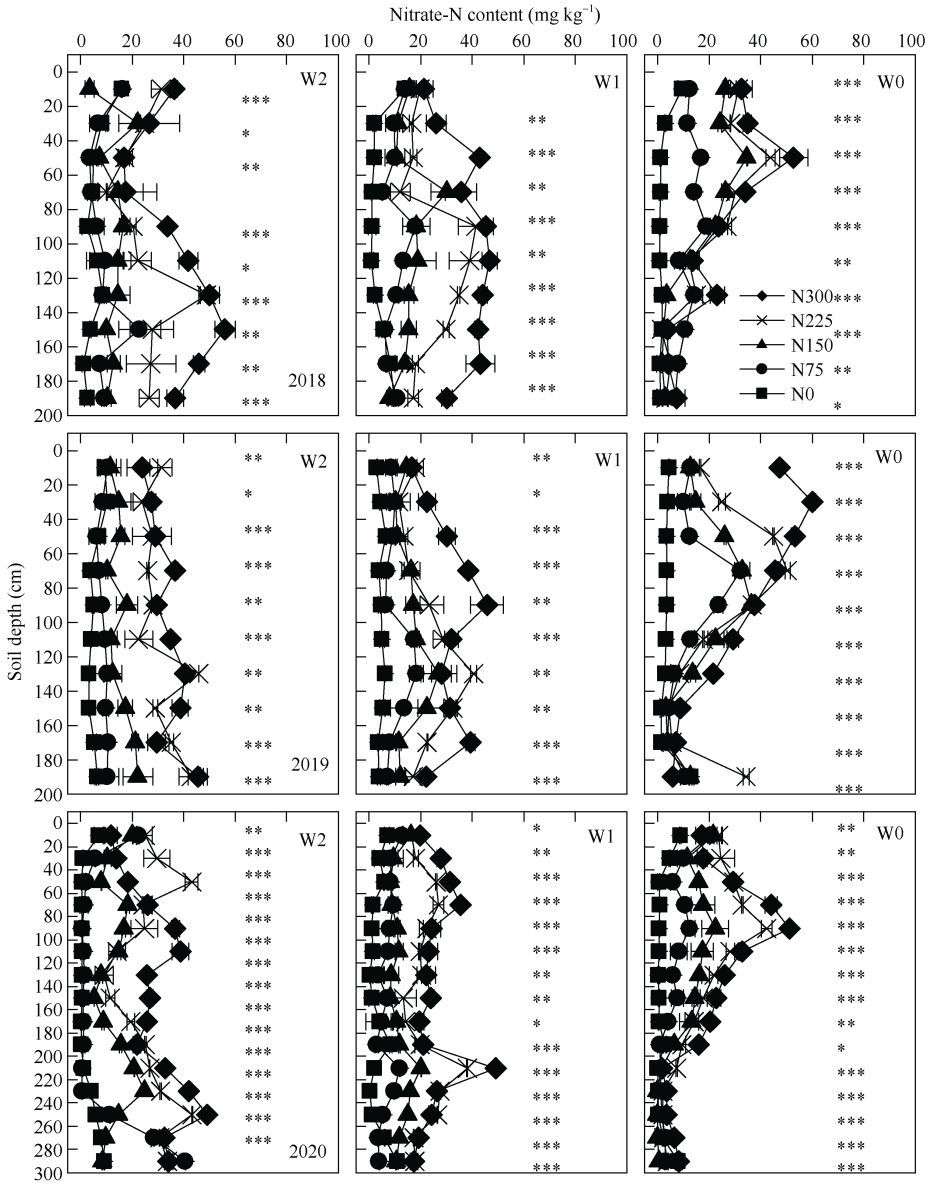


图 2　2018–2020 年玉米收获后 0~200 cm、0~300 cm 土层土壤硝态氮含量剖面图

Fig. 2　Soil nitrate nitrogen content in 0–200 cm and 0–300 cm profile after maize harvest in 2018–2020

N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2}; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2}; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2}; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2}; N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2}; W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水, *表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。

N300: nitrogen application rate was 300 kg hm^{-2}; N225: nitrogen application rate was 225 kg hm^{-2}; N150: nitrogen application rate was 150 kg hm^{-2}; N75: nitrogen application rate was 75 kg hm^{-2}; 0: no nitrogen application; W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} in jointing and tasseling stage; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation. *, **, and *** indicate significant difference at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

W1 大于 W2, 2020 年 0~100 cm 土层中硝态氮含量 W0 和 W1 大于 W2, 60 cm、100 cm 以下则是 W2 大于 W1、W0。2018 年 W2、W1、W0 累积峰分别出现在 120~160 cm、80~120 cm、40~60 cm; 2019 年 W2 处理累积峰不明显, 可能出现在 200 cm 以下, W1 下 N300 在 80、180 cm 土层出现累积峰, N225、N150 在 120~140 cm 土层出现累积峰, W0 下在 60~80 cm 出现累积峰; 2020 年 W2 下硝态氮含量在 0~100 cm、200~300 cm 土层时较高, W1、W0 则分别在 200~220 cm、80~100 cm 出现累积峰, 由此说明, 随着试验年份的推进, 硝态氮累积向下层土壤移动, 灌水量增大显著加快硝态氮向下淋洗。不同水氮减量处理下, N300 和 N225 硝态氮含量显著高于 N150、N75、N0, 且随着灌水量的变化波动幅度明显,

说明施氮和灌水显著影响硝态氮含量和向下的迁移，施氮量增大，含量越大，灌水增多，向下迁移加快。

由图 3 和图 4 可知，施氮量和灌水量对硝态氮残留有显著影响。随着施氮量的减小，2018—2020

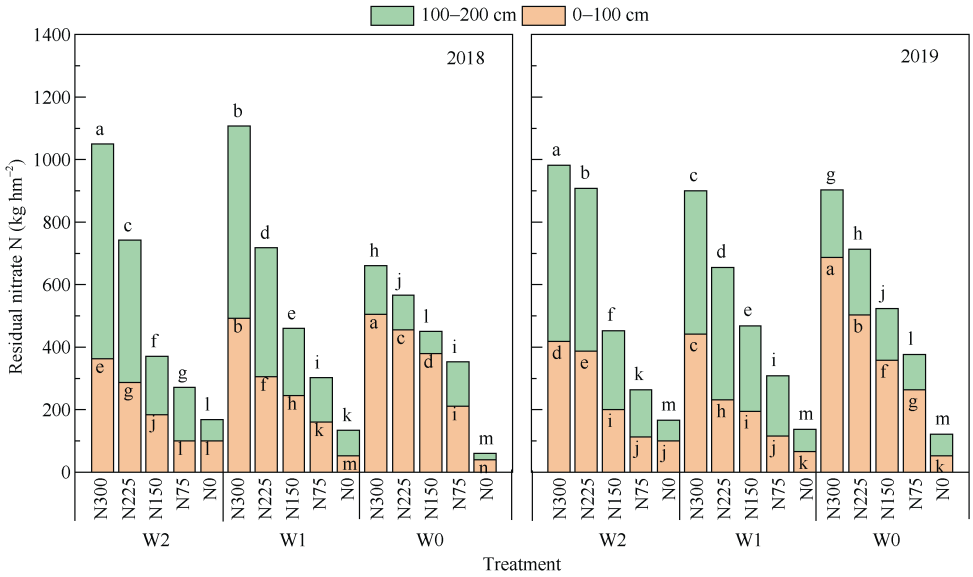


图 3 不同水氮减量处理下玉米田 0~200 cm 土层硝态残留量

Fig. 3 Residual nitrogen in 0–200 cm under different water and nitrogen reduction treatments

N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2}; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2}; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2}; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2}; N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2}; W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水。同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

N300: nitrogen application rate was 300 kg hm^{-2}; N225: nitrogen application rate was 225 kg hm^{-2}; N150: nitrogen application rate was 150 kg hm^{-2}; N75: nitrogen application rate was 75 kg hm^{-2}; 0: no nitrogen application; W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} at jointing and tasseling stages; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation. Values followed by different lowercase letters within a column indicate significant difference among treatments in the same year at $P < 0.05$.

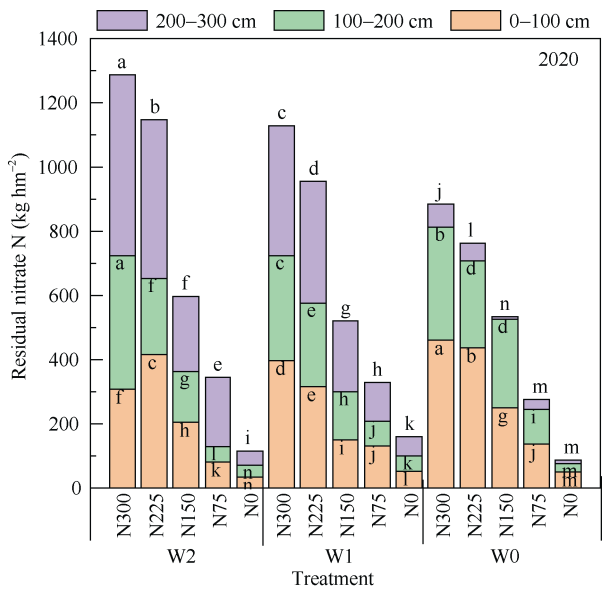


图 4 不同水氮减量处理下玉米田 0~300 cm 土层硝态残留量

Fig. 4 Residual nitrogen in 0–300 cm under different water and nitrogen reduction treatments

N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2}; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2}; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2}; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2}; N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2}; W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水。同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

N300: nitrogen application rate was 300 kg hm^{-2}; N225: nitrogen application rate was 225 kg hm^{-2}; N150: nitrogen application rate was 150 kg hm^{-2}; N75: nitrogen application rate was 75 kg hm^{-2}; 0: no nitrogen application; W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} at jointing and tasseling stages; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation. Values followed by different lowercase letters within a column indicate significant difference among treatments in the same year at $P < 0.05$.

年硝态氮残留量不断减少, 因此, 减少施氮量可以减小硝态氮淋溶风险。从灌水来看, 2018—2020 年 0~100 cm 硝态氮残留量为 W0>W1>W2, 而 2018—2019 年在 100~200 cm 土层则是 W2>W1>W0, 2020 年 100~200 cm 土层为 W0>W1>W2, 200~300 cm 为 W2>W1>W0, 其原因可能是因为灌水使硝态氮不断向下层土壤迁移。不同水氮减量处理下, 相比对照 W2N300 来说, 其他水氮减量处理硝态氮残留减小 15.6%~91.9%。

2.4　不同水氮减量处理产量、氮肥利用、土壤硝态氮残留量与施氮量的关系

3 年试验结果(表 4)表明, 施氮量与产量和土壤硝态氮残留呈极显著二次函数的关系(P<0.001), 施氮量与氮肥农学效率、氮肥回收效率、氮肥偏生产力显著线性相关(P<0.01), 均随施氮量的减少呈增加趋势。

2.5　不同水氮组合的综合效应评价

2.5.1　*权重确定*　通过层次分析法确定权重, 产量、吸氮量、NAE、NRE、NPFP 和硝态氮所占权重依次为 0.619、0.026、0.031、0.045、0.054 和 0.226, 由于层次分析法是评价者对评价问题本质的分析和判断, 因此, 此种方法指标 3 年权重相同。

熵权法是一种客观分析方法, 其中产量、吸氮量、NAE、NRE、NPFP 为正向指标, 硝态氮为负向指标, 通过 SPSSPRO 软件分析所得指标权重分别为: 2018 年产量、吸氮量、NAE、NRE、NPFP、硝态氮分别为 0.108、0.114、0.198、0.213、0.247、0.121; 2019 年分别为 0.457、0.064、0.109、0.117、0.144、0.108; 2020 年分别为 0.094、0.139、0.186、0.184、0.225、0.173。

表 4　夏玉米产量、氮肥利用率和 0~200 cm 土层硝态氮残留量与施氮量的回归分析模型

Table 4　Regression analysis model between summer maize yield, nitrogen use efficiency, residual nitrate in 0–200 cm soil layer and nitrogen application rate

灌水 Irrigation	项目 Item	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination
W2	Y	$y = 7351.3+21.5x–0.045x^2$	0.928^{***}
	NR	$y = 97.5+1.7x+0.0039x^2$	0.874^{***}
	NAE	$y = 21.0–0.042x$	0.736^{***}
	NRE	$y = 55.2–0.092x$	0.790^{***}
	NPFP	$y = 135.7–0.38x$	0.880^{***}
W1	Y	$y = 7579.7+24.1x–0.055x^2$	0.823^{***}
	NR	$y = 135.5+1.5x+0.0036x^2$	0.887^{***}
	NAE	$y = 24.6–0.051x$	0.800^{***}
	NRE	$y = 73.2–0.16x$	0.638^{**}
	NPFP	$y = 133.9–0.36x$	0.871^{***}
W0	Y	$y = 6194.0+23.7x–0.054x^2$	0.783^{***}
	NR	$y = 70.6+1.5x+0.0038x^2$	0.989^{***}
	NAE	$y = 22.6–0.051x$	0.709^{***}
	NRE	$y = 66.8–0.17x$	0.617^{**}
	NPFP	$y = 118.5–0.33x$	0.873^{***}

W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水, Y: 产量; NR: 硝态氮残留量; NAE: 氮肥农学效率; NRE: 氮肥回收效率; NPFP: 氮肥偏生产力。*表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。

W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} at jointing and tasseling stages; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation; Y: yield; NR: residual nitrate; NAE: nitrogen agronomic efficiency; NRE: nitrogen recovery efficiency; NFPF: N partial factor productivity. *, **, and *** indicate significant difference at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

由于层次分析法和熵权法所得权重之间存在差异, 因此采用博弈论组合赋权的方法确定指标的最终权重, 2018 年产量、吸氮量、NAE、NRE、NPFP、硝态氮权重分别为 0.337、0.120、0.108、0.122、0.144、0.168; 2019 年分别为 0.568、0.047、0.057、0.065、0.074、0.188; 2020 年分别为 0.336、0.088、0.107、0.125、0.147、0.197。

2.5.2　*不同水氮组合的综合评价方法-TOPSIS 法*

图 5 表明贴合度 D^i 与产量 B_{11}、吸氮量 B_{21}、氮肥农学效率 B_{22}、氮肥回收效率 B_{23} 的相关性达到极显著水平(P<0.001), 贴合度 D^i 与氮肥偏生产力 B_{24} 的相关性达到显著水平(P<0.01), 由此说明利用 TOPSIS 法确定水氮减量对夏玉米综合评价指标的影响是可行的。

通过 TOPSIS 法从高产、高效、环保 3 方面出发，确定不同水氮组合的综合评价指标排序(表 5)，3 年综合排序排名前 5 的处理分别为 W1N225、W2N150、W1N150、W2N225、W2N75，W1N225、W2N150、W1N150、W2N75、W1N300，W1N150、W1N225、W1N300、W2N75、W2N150。在同一灌水水平下，与 N300 相比，N225、N150 时综合指标分别增大 10.3%、14.4%，在同一施氮水平下，与 W2 相比，综合指标 W1 增大 4.1%，由此可知，水氮减量优于传统水氮管理模式。氮肥减量 25%~50%、灌水减少 50%时各指标评价值最高，因此，在关中平原灌溉区可以通过水氮减量实现玉米高产、节约资源和保护环境的目标。由 W2N300、W2N150、W1N225、W1N150、W0N300、W0N0 可知，水氮协同调控夏玉米综合指标，水氮减量(中水中肥)优于高水高肥，高水高肥优于低水低肥，高水低肥优于低水高肥，因此，在关中平原可以适当减少施氮量来提高夏玉米综合评价值。

将综合评价值与施氮量进行拟合(图 6)，综合评价值与施氮量呈显著的二次函数的关系，在同一灌水水平下，综合评价值随施氮量的增加先增后降。

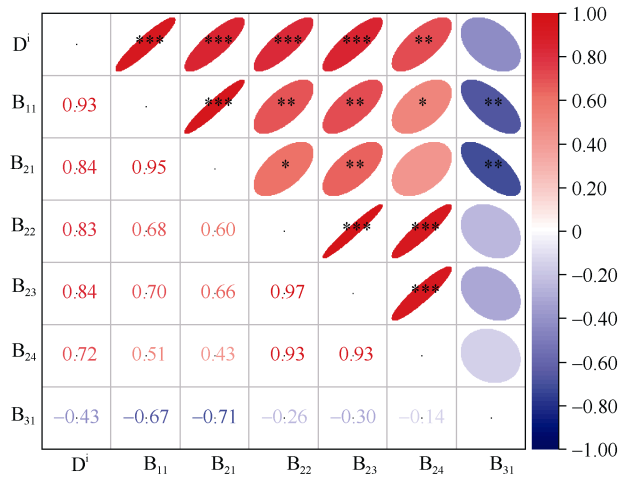


图 5 贴合度与不同指标的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between the degree of fit and different indexes

D^i: 贴合度; B_{11}: 产量; B_{21}: 吸氮量; B_{22}: 氮肥农学效率; B_{23}: 氮肥回收效率; B_{24}: 氮肥偏生产力; B_{31}: 硝态残留量。*表示在 0.05 概率水平差异显著, **表示在 0.01 概率水平差异显著, ***表示在 0.001 概率水平差异显著。

D^i: the degree of fit; B_{11}: maize; B_{21}: aboveground nitrogen uptake of summer maize; B_{22}: nitrogen agronomic efficiency; B_{23}: nitrogen recovery efficiency; B_{24}: N partial factor productivity; B_{31}: residual nitrogen. *, **, and *** indicates significant difference at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

表 5 基于 TOPSIS 法确定的不同水氮处理的贴近度和综合排序

Table 5 Degree of fit and ranking under different water and nitrogen treatments determined by TOPSIS method

处理 Treatment	2018				2019				2020			
	D^+	D^-	D^i	排序 Rank	D^+	D^-	D^i	排序 Rank	D^+	D^-	D^i	排序 Rank
W2N300	0.217	0.348	0.616 d	7	0.213	0.509	0.705 e	7	0.252	0.259	0.507 f	10
W2N225	0.164	0.374	0.695 bc	4	0.193	0.516	0.728 de	6	0.207	0.308	0.598 d	7
W2N150	0.132	0.343	0.722 b	2	0.125	0.498	0.800 ab	2	0.173	0.374	0.683 c	5
W2N75	0.153	0.317	0.674 c	5	0.143	0.471	0.767 c	4	0.155	0.334	0.683 c	4
W2N0	0.333	0.185	0.357 g	13	0.408	0.252	0.381 i	14	0.344	0.214	0.384 h	12
W1N300	0.228	0.326	0.588 d	8	0.186	0.571	0.754 cd	5	0.135	0.347	0.720 b	3
W1N225	0.111	0.369	0.769 a	1	0.133	0.570	0.811 a	1	0.129	0.346	0.728 b	2
W1N150	0.132	0.335	0.718 b	3	0.138	0.484	0.778 bc	3	0.102	0.387	0.792 a	1
W1N75	0.167	0.345	0.673 c	6	0.202	0.414	0.672 f	8	0.223	0.340	0.604 d	6
W1N0	0.354	0.176	0.332 g	14	0.412	0.254	0.382 i	13	0.339	0.203	0.374 h	13
W0N300	0.253	0.212	0.456 f	12	0.293	0.349	0.544 h	11	0.309	0.184	0.374 h	14
W0N225	0.235	0.221	0.485 ef	11	0.247	0.379	0.605 g	9	0.265	0.216	0.449 g	11
W0N150	0.223	0.231	0.508 e	9	0.243	0.370	0.604 g	10	0.215	0.253	0.541 e	8
W0N75	0.247	0.244	0.497 e	10	0.292	0.331	0.531 h	12	0.242	0.259	0.517 ef	9
W0N0	0.419	0.168	0.286 h	15	0.581	0.188	0.245 j	15	0.411	0.191	0.317 i	15

TOPSIS: 优劣解距离法; N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2}; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2}; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2}; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2}; N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2}; W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水; D^+: 理想解和处理间距离; D^-: 逆理想解和处理间距离; D^i: 贴合度。同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

TOPSIS: technique for order preference by similarity to an ideal solution; N300: nitrogen application rate was 300 kg hm^{-2}; N225: nitrogen application rate was 225 kg hm^{-2}; N150: nitrogen application rate was 150 kg hm^{-2}; N75: nitrogen application rate was 75 kg hm^{-2}; 0: no nitrogen application; W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} at jointing and tasseling stages; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation; D^+: the distance between the ideal solution and the treatment; D^-: the distance between the inverse ideal solution and the treatment; D^i: the degree of fit. Values followed by different lowercase letters within a column indicate significant difference among treatments in the same year at $P < 0.05$.

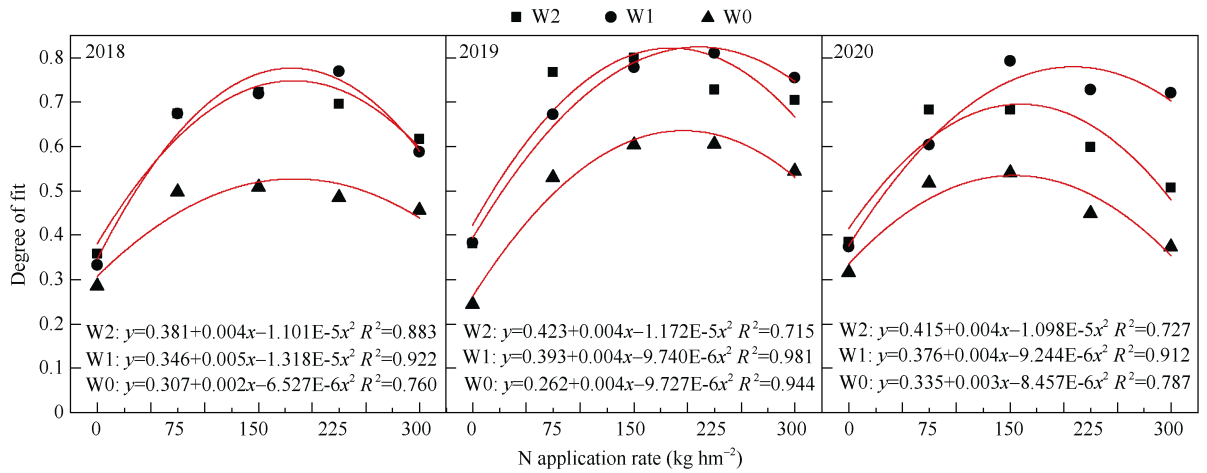


图 6　不同灌水条件下综合评价贴合度与施氮量的关系
Fig. 6　Relationships between the degree of fit and nitrogen application rate under different irrigation conditions
W2: 拔节期和抽雄期共灌水 800 m^3 hm^{-2}; W1: 拔节期灌水 400 m^3 hm^{-2}; W0: 不灌水。
W2: irrigated 800 m^3 hm^{-2} at jointing and tasseling stages; W1: irrigated 400 m^3 hm^{-2} at jointing stage; W0: no irrigation.

图 6 中水氮减量(中水中肥)综合评价值维持在较高水平，且高水低肥优于低水高肥，因此为了提高综合评价值可以施氮减少施氮量。在 2018、2019、2020 年 W2、W1、W0 水平下施氮量分别为 182.6、180.6、183.9, 184.7、210.5、195.9, 159.8、208.8 和 153.7 kg hm^{-2} 时，综合评价值最高为 0.74、0.82、0.45, 0.76、0.80、0.67, 0.77、0.81、0.60, W2、W1、W0 下减氮 41.3%、33.3%、40.7%仍可达到最优。通过模型模拟寻优，得出在灌水量为 W1 (400 m^3 hm^{-2})，施氮量为 200 kg hm^{-2} 时综合评价值最优。

3　讨论

3.1　水氮减量对夏玉米产量和氮素利用的影响

施氮和灌水是作物增产的主要手段，二者相互协调可以促使玉米高产。农业生产中多通过增施氮肥来增产，但实际生产中，作物产量却随施氮量的增加而减少[28]，玉米生育期内耗水量高，只有合理灌溉才可以提高氮素利用率并增产[29]。本研究发现，减水 50%和减氮 25%~50%产量小幅增加，这与邢维芹等[30]在半干旱地区进行的研究结果相似，适宜水氮减量玉米产量下降幅度小于 15.26%，且水分利用率提高。本研究中减水 50%和减氮 25%~50% NAE、NRE、NPFP 随施氮量减少呈增加趋势，氮素利用保持在较高水平，植株吸氮量与传统水氮管理模式无显著差异。前人研究发现，与习惯灌水和施氮量相比，水氮减量处理提高氮素利用率且对夏玉米产量无显著影响[31]；减少施氮量且水分为田间持水量的 75% ± 5%的土壤条件时，可以提高植株氮素积累量，合理的水氮运筹方式有利于高产群体的构建[32]；适宜减少施氮量显著提高籽粒氮素积累，提高植株氮素吸收[14]。造成以上现象的原因：一是适宜氮肥用量可以提高叶片的叶绿素含量，提高叶片光合碳同化能力，延长光合时间，促进光合同化物向籽粒转移，进而提高产量[33]。二是过量施氮其增产效果会随施氮量增加逐渐减弱，在土壤水分不足时，水分制约氮肥发挥效用，当水分过多则会增加氮素损失，进而氮素利用降低[34]。因此，在关中平原玉米生产中可以适当减少灌溉量和施氮量，会有小幅增产，且提高氮素利用效率，减少资源浪费。

3.2　水氮减量对土壤硝态氮残留的影响

施氮和灌水是影响土壤硝态氮含量及其残留的重要因素，二者增加会使土壤中硝态氮的残留量增加[35-37]，同时硝态氮向下迁移的速度加快[38]。本研究中，土壤硝态氮含量 N300>N225>N150>N75>N0，且残留量 W2>W1>W0。2019、2020 年灌水处理 N300 下硝态氮随土层的加深出现 2 个累积峰。其原因可能是土壤质地导致，塿土中有黏化层的存在(多在 60~140 cm)，黏化层上硝态氮分部较均匀，高施氮量下硝态氮迁移到黏化层以下迁移变快，在较深土层则会出现第 2 个累积峰[35]。同时，0~100 cm、100~200 cm、200~300 cm 土层硝态氮残留量出现显著的差异。其原因可能是由于土壤中 NO_3^--N 的运动一般与水分同步或略滞后[39]，灌水量的差异致使不同土层残留量的不同。因此，在关中平原农业生产中实施水氮减量可以减少土壤中硝态氮含量和残留，降低土壤、地下水污染的风险。

3.3 基于 TOPSIS 的水氮减量方案模拟寻优

水氮管理模式的优选，通常是水氮用量对作物产量、氮素利用等的单变量回归分析，从养分资源效率最大化目标确立适宜的水氮用量，单变量回归多适用于指标较少的评价，不适用于多指标判定。前人通过综合评价体系建立多变量回归分析探究作物对水肥用量的响应[40-41]，研究表明，各指标对应的最佳水氮组合并不是水氮投入越多越优。本研究通过综合评价体系建立多变量回归分析，运用数学方法定量化研究产量、氮素利用、环境等多指标对水肥用量的综合效果，确定最优水氮减量方案的灌溉量和施氮量 (灌水为 400 m^3 hm^{-2}，施氮 200 kg hm^{-2})。前人通过综合评价法[42]和综合指数法[9]的研究也表明，综合得分随施氮量的增加呈先增后降的趋势，选取综合得分高于 0.8 的确定为适宜施氮量，推荐施氮 186~225 kg hm^{-2} 可以实现高产高效、农田环境友好氮肥体系；综合指标值定量地显示了减氮 20%的包膜尿素应用综合效果最佳。因此，在关中平原夏玉米拔节期灌水量 400 m^3 hm^{-2} 和总施氮量 200 kg hm^{-2} 可以实现高产高效、资源节约、保护环境的目标。

4 结论

在关中平原灌区，在目前常规管理中灌水 800 m^3 hm^{-2} 和施氮量 300 kg hm^{-2} 基础上，灌水减量 50%、施氮减量 25%~50%时，夏玉米获得较高产量，氮素利用效率保持较高水平，且减少土壤硝态氮残留。水氮减量显著影响夏玉米综合评价指标，综合各指标对水氮减量的响应，通过 TOPSIS 法对水氮减量方案模拟寻优，拔节期灌水量 400 m^3 hm^{-2} 和总施氮量 200 kg hm^{-2} 可以作为关中平原夏玉米节水节肥、高效环保的生产模式。

References

[1] 尚文彬, 张忠学, 郑恩楠, 刘明. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 49–55.
Shang W B, Zhang Z X, Zheng E N, Liu M. Nitrogen-water coupling affects nitrogen utilization and yield of film-mulched maize under drip irrigation. *J Irrig Drain*, 2019, 38(1): 49–55 (in Chinese with English abstract).

[2] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题. 植物营养与肥料学报, 2014, 20: 1–6.
Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. Solving the problem of nitrogen pollution under high input conditions. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 1–6 (in Chinese with English abstract).

[3] 王大鹏, 郑亮, 吴小平, 罗雪华, 王文斌, 张永发, 薛欣欣. 旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施. 中国生态农业学报, 2017, 25: 1731–1741.
Wang D P, Zheng L, Wu X P, Luo X H, Wang W B, Zhang Y F, Xue X X. Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25: 1731–1741 (in Chinese with English abstract).

[4] 唐文雪, 马忠明, 王景才. 施氮量对旱地全膜双垄沟播玉米田土壤硝态氮、产量和氮肥利用率的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 58–63.
Tang W X, Ma Z M, Wang J C. Effects of nitrogen rate on soil nitrate-N, yield and nitrogen use efficiency of double-ridge furrow sowing with full plastic film mulching for maize in dryland. *Agric Res Arid Areas*, 2015, 33(6): 58–63 (in Chinese with English abstract).

[5] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, (1): 1–6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plant-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Ecol Environ Sci*, 2000, (1): 1–6 (in Chinese with English abstract).

[6] 张勇. 从陕西水资源状况看节水灌溉. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3): 60–62.
Zhang Y. Water resources and water-saving irrigation in Shaanxi province. *Agric Res Arid Areas*, 2002, 20(3): 60–62 (in Chinese with English abstract).

[7] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 李军, 王瑞. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响. 作物学报, 2020, 46: 924–936.
Luo W H, Shi Z J, Wang X M, Li J, Wang R. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 924–936 (in Chinese with English abstract).

[8] 屈佳伟, 高聚林, 于晓芳, 王志刚, 胡树平, 孙继颖, 苏治军, 谢岷, 青格尔. 不同氮效率玉米品种对土壤硝态氮时空分布及农田氮素平衡的影响. 作物学报, 2018, 44: 737–749.
Qu J W, Gao J L, Yu X F, Wang Z G, Hu S P, Sun J Y, Su Z J, Xie M, Qing G E. Effects of maize varieties with different nitrogen efficiencies on temporal and spatial distribution of soil nitrate and field nitrogen balance. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 737-749 (in Chinese with English abstract).

[9] 刘慧颖, 牛世伟, 董环. 综合指数法定量评价玉米氮肥施用综合效应. 中国土壤与肥料, 2016, (6): 106–110.
Liu H Y, Niu S W, Dong H. Quantitative assessment on effects of N application on maize with integrated evaluation index. *Soil Fert Sci China*, 2016, (6): 106–110 (in Chinese with English abstract).

[10] Gu L M, Liu T N, Zhao J, Dong S T, Liu P, Zhang J W, Zhao B. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain. *J Integr Agric,* 2015, 14: 374–388.

[11] 任中生, 屈忠义, 李哲, 刘安琪. 水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响. 水土保持学报, 2016, 30(5): 149–155.
Ren Z S, Qu Z Y, Li Z, Liu A Q. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of mulched drip-irrigated maize in Hetao

Irrigation District, China. *J Soil Water Conser*, 2016, 30(5): 149–155 (in Chinese with English abstract).

[12] 潘晓莹, 武继承. 水肥耦合效应研究的现状与前景. 河南农业科学, 2011, 40(10): 20–23.
Pan X Y, Wu J C. Current situation and prospects of water and fertilizer coupling effects. *J Henan Agric Sci*, 2011, 40(10): 20–23 (in Chinese with English abstract).

[13] 刘凡, 刘斌祥, 刘佳媛, 杜霞, 孔凡磊, 袁继超. 水氮互作对川中丘陵区玉米水肥利用效率和产量形成的影响. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 200–206.
Liu F, Liu B X, Liu J Y, Du X, Kong F L, Yuan J C. Effect of water and nitrogen interaction on maize utilization efficiency of fertilizer, water and yield formation in the Middle Hilly Area of Sichuan province. *Agric Res Arid Areas*, 2021, 39(6): 200–206 (in Chinese with English abstract).

[14] 王旭敏, 雒文鹤, 刘朋召, 张琦, 王瑞, 李军. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应. 中国农业科学, 2021, 54: 3183–3197.
Wang X M, Luo W H, Liu P Z, Zhang Q, Wang R, Li J. Regulation effects of water saving and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation, transportation and yield of summer maize. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 3183–3197 (in Chinese with English abstract).

[15] 尹彩侠, 李前, 孔丽丽, 秦裕波, 王蒙, 于雷, 刘春光, 王立春, 侯云鹏. 控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 3941–3950.
Yin C X, Li Q, Kong L L, Qin Y B, Wang N, Yu L, Liu C G, Wang L C, Hou Y P. Effect of reduced controlled-release nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and transportation of spring maize. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 3941–3950 (in Chinese with English abstract).

[16] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响. 土壤与环境, 2000, 9(1): 23–26.
Fan J, Hao M D, Dang T H. Distribution and accumulation of NO_3^--N in soil profile of long-term located fertilizer experiment. *Ecol Environ Sci*, 2000, 9(1): 23–26 (in Chinese with English abstract).

[17] 刘朋召, 王旭敏, 宁芳, 雒文鹤, 张琦, 张元红, 李军. 减量施氮对渭北旱地春玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响. 应用生态学报, 2020, 31: 2621–2629.
Liu P Z, Wang X M, Ning F, Luo W H, Zhang Q, Zhang Y H, Li J. Effects of reduced nitrogen application on yield, nitrogen utilization of spring maize and soil nitrate content in Weibei dryland northwest China. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 2621–2629 (in Chinese with English abstract).

[18] 吴得峰, 姜继韶, 孙棋棋, 王蕊, 李如剑, 王志齐, 刘洪星, 崔全红, 郭胜利, 党廷辉, 巨晓棠. 减量施氮对雨养区春玉米产量和环境效应的影响. 农业环境科学学报, 2016, 35: 1202–1209.
Wu D F, Jiang J S, Sun Q Q, Wang R, Li R J, Wang Z Q, Liu H X, Cui Q H, Guo S L, Dang T H, Ju X T. Effect of reduced nitrogen fertilization on spring maize production and environmental impacts in rainfed areas. *J Agro-Environ Sci*, 2016, 35: 1202–1209 (in Chinese with English abstract).

[19] 张倩, 韩本高, 张博, 盛开, 李岚涛, 王宜伦. 控失尿素减施及不同配比对夏玉米产量及氮肥效率的影响. 作物学报, 2022, 48: 180–192.
Zhang Q, Han B S, Zhang B, Sheng K, Li L T, Wang Y L. Reduced application and different combined applications of loss-control urea on summer maize yield and fertilizer efficiency improvement. *Acta Agron Sin*, 20 22, 48: 180–192 (in Chinese with English abstract).

[20] 冯小杰, 战秀梅, 王颖, 赵蔚, 王雪鑫, 李俊, 何天池, 陈坤, 彭靖, 韩晓日. 稳定性氮肥减施对春玉米氮素吸收及土壤无机氮供应的影响. 植物营养与肥料学报, 2020, 26: 1216–1225.
Feng X J, Zhan X M, Wang Y, Zhao W, Wang X X, Li J, He T C, Chen K, Peng J, Han X R. Effects of stabilized nitrogen fertilizer reduction on nitrogen uptake of spring maize and inorganic nitrogen supply in soils. *J Plant Nutr Fert*, 2020, 26: 1216–1225 (in Chinese with English abstract).

[21] 郑利芳, 吴三鼎, 党廷辉. 不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响. 水土保持学报, 2019, 33(4): 221–227.
Zheng L F, Wu S D, Dang T H. Effects of different fertilization models on spring maize yield, water use efficiency and nitrate nitrogen residue. *J Soil Water Conser*, 2019, 33(4): 221–227 (in Chinese with English abstract).

[22] 董强, 吴得峰, 党廷辉, 郭胜利. 黄土高原南部不同减氮模式对春玉米产量及土壤硝态氮残留的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23: 856–863.
Dong Q, Wu D F, Dang T H, Guo S L. Effects of different nitrogen reduction modes on yield of spring maize and nitrate-N residue in soils of the southern Loess Plateau. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23: 856–863 (in Chinese with English abstract).

[23] Albayrak E, Erensal Y C. Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: An application of multiple criteria decision making problem. *J Intell Manuf*, 2004, 15: 491–503.

[24] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *J Environ Sci*, 2006, 18: 1020–1023.

[25] 赵奎, 刘维发, 曾鹏, 张亮. 基于博弈论组合赋权 TOPSIS 法的深部进路参数优选. 有色金属科学与工程, 2018, 9(2): 70–74.
Zhao K, Liu W F, Zeng P, Zhang L. Optimization of structural parameters of deep stope based on combination weighting game theory. *Nonfer Metals Sci Eng*, 2018, 9(2): 70–74 (in Chinese with English abstract).

[26] Wang F, Kang S Z, Du T S, Li F S, Qiu R J. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. *Agric Water Manag*, 2011, 98: 1228–1238.

[27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 257–270.
Bao S D. Soil and Agro-Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 257–270 (in Chinese).

[28] 戴健, 王朝辉, 李强, 李孟华, 李富翠. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响. 土壤学报, 2013, 50: 956–965.
Dai J, Wang Z H, Li Q, Li M H, Li F C. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland. *Acta Pedol Sin*, 2013, 50: 956–965 (in Chinese with English abstract).

[29] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 刘涛, 褚贵新. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26: 3679–3686.
Guo B Y, Gao H, Tang C, Liu T, Chu G X. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 3679–3686 (in Chinese with English abstract).

[30] 邢维芹, 王林权, 骆永明, 李立平, 李生秀. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究. 农业工程学报, 2002, 18(6): 46–49.
Xing W Q, Wang L Q, Luo Y M, Li L P, Li S X. Effect of spacial coupling between irrigation water and fertilizer on corn in semi-arid area. *Trans CSAE*, 2002, 18(6): 46–49 (in Chinese with English abstract).

[31] 谢英荷, 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 张璐. 施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 1354–1361.
Xie Y H, Li L, Hong J P, Wang H T, Zhang L. Effects of nitrogen application and irrigation on grain yield, water and nitrogen utilizations of summer maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 1354–1361 (in Chinese with English abstract).

[32] 李广浩, 董树亭, 赵斌, 张吉旺, 刘鹏. 不同土壤水分状况下实现夏玉米高产及氮素高效的控释尿素用量研究. 植物营养与肥料学报, 2018, 24: 579–589.
Li G H, Dong S T, Zhao B, Zhang J W, Liu P. Optimal application rates of controlled release urea for high yield and high nitrogen use efficiency of summer maize under different soil water conditions. *J Plant Nutr Fert*, 2018, 24: 579–589 (in Chinese with English abstract).

[33] 侯云鹏, 孔丽丽, 杨建, 尹彩侠, 秦裕波, 李前, 于雷, 王立春, 谢佳贵. 氮肥运筹对春玉米产量、养分吸收和转运的影响. 玉米科学, 2016, 24(4): 137–143.
Hou Y P, Kong L L, Yang J, Yin C X, Qin Y B, Li Q, Yu L, Wang L C, Xie J G. Effects of nitrogen fertilizer management on yield, nutrient absorption and translocation of spring maize. *J Maize Sci*, 2016, 24(4): 137–143 (in Chinese with English abstract).

[34] 刘凡, 刘斌祥, 刘佳媛, 杜霞, 孔凡磊, 袁继超. 水氮互作对川中丘陵区玉米水肥利用效率和产量形成的影响. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 200–206.
Liu F, Liu B X, Liu J Y, Du X, Kong F L, Yuan J C. Effect of water and nitrogen interaction on maize utilization efficiency of fertilizer, water, and yield formation in the middle hilly area of Sichuan province. *Agric Res Arid Areas,* 2021, 39(6): 200–206 (in Chinese with English abstract).

[35] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 同延安. 长期施肥对塿土硝态氮分布、累积和移动的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7: 134–138.
Yang X Y, Zhang S L, Yuan X M, Tong Y A. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation, and movement of NO_3-N in soil. *Plant Nutr Fert Sci*, 2001, 7: 134–138 (in Chinese with English abstract).

[36] Manevski K, Brgesen C D, Li X X. Optimising crop production and nitrate leaching in China: measured and simulated effects of straw incorporation and nitrogen fertilization. *Eur J Agron*, 2016, 80: 32–44.

[37] Zhou S L, Wu Y C, Wang Z M, Lu L Q, Wang R Z. The nitrate leached below maize root zone is available for deep rooted wheat in winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain. *Environ Pollut*, 2008, 152: 723–730.

[38] 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 苏涛. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究. 土壤, 2006, 38: 676–681.
Wang Z H, Li S X, Wang X N, Su T. Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors. *Soils*, 2006, 38: 676–681 (in Chinese with English abstract).

[39] Moreno F, Cayuela J A, Fermández-Boy J E, Murillo J M, Cabrera F. Water balance and nitrate leaching in an irrigation maize crop in SW Spain. *Agric Water Manag*, 1996, 32: 71–83.

[40] 李建明,于雪梅, 王雪威, 张俊威, 焦晓聪, 黄茜. 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化. 农业工程学报, 2020, 36(9): 75–83.
Li J M, Yu X M, Wang X W, Zhang J W, Jiao X C, Huang Q. Optimization of fertigation scheduling for drip-irrigated watermelon based on its yield, quality and fertilizer and water use efficiency. *Trans CSAE*, 2020, 36(9): 75–83 (in Chinese with English abstract).

[41] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 杜清洁, 常毅博, 张大龙, 刘媛. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82–90.
Li J M, Pan T H, Wang L H, Du Q J, Chang Y B, Zhang D L, Liu Y. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency. *Trans CSAE*, 2014, 30(10): 82–90 (in Chinese with English abstract).

[42] 钟华, 郭旋, 李鹏, 张成军, 赵同科. 东北雨养玉米氮肥优化管理综合评价. 植物营养与肥料学报 2022, 28: 357–365.
Zhong H, Guo X, Li P, Zhang C J, Zhao T K. Comprehensive assessment of nitrogen fertilizer management for maize in northeast rainfed region. *J Plant Nutr Fert*, 2022, 28: 357–365 (in Chinese with English abstract).