中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 9 期: 1413 ~ 1424
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响——以天山北坡城市群为例

方创琳[1,2*], 高倩[2], 张小雷[3], 程卫国[2]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011
* E-mail: fangcl@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2018-11-23; 收修改稿日期: 2019-04-24; 接受日期: 2019-05-20; 网络版发表日期: 2019-07-03
国家自然科学基金重大项目(批准号: 41590842)和中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA20040400)资助

摘要 城市群是国家工业化和城镇化发展到高级阶段的产物, 是高度一体化的城市群体, 天山北坡城市群是国家“十三五”期间推动建设的19个城市群之一, 也是国家重点建设的两个边疆地区城市群之一和新疆新型城镇化主体区与经济发展的战略核心区. 采用1980~2015年土地利用遥感监测数据分析发现, 天山北坡城市群建设用地扩展对生态环境造成了显著影响. 结果表明, 近35年来, 城市群内的草地是生态价值的最主导贡献类型, 生态价值贡献率高达66.27%, 年际变化幅度仅5%; 城乡居民点及工矿用地生态价值贡献率很低(0.82%), 但年际变化幅度很大(86%). 城市群建设用地面积由1067km^{2}扩展至2586km^2, 用地类型变动对生态价值的影响差异很大, 变动幅度最大的是低覆盖度草地和旱地. 生态用地转化为建设用地的规模多达1685km^2, 其中69.91%来自于耕地和草地, 仅旱地和低覆盖度草地转变面积达1082km^2, 占生态用地向建设用地转变总量的64.21%, 2000年以来至城市群建设用地扩展后期(2000~2015年), 戈壁(172km^2)、裸土地(65km^2)、盐碱地(65km^2)等未利用地类型向建设用地转化比重明显增加. 而建设用地转化为生态用地的规模仅不到166km^2. 城市群建设用地的重点扩展区集中在乌鲁木齐、克拉玛依和昌吉, 扩展面积分别达到399、186和126km^2, 快速扩展区集中在奎屯、托克逊和乌苏. 城市群扩展后期建设用地变更对生态环境的积极影响较前期(1980~2000年)明显. 奎屯市、石河子市和五家渠市属于建设用地扩展引发生态价值变动的高值区, 其余城市建设用地扩展引发的生态价值变动相对较小且后期扩展有所减缓. 未来天山北坡城市群的发展必须充分考虑其脆弱生态环境的敏感性和承载力, 以可容许的水资源与生态环境容量调控城市群的人口与产业集聚规模, 降低城市群建设用地扩展对生态环境的压力, 提升其发展的可持续性.

关键词 天山北坡城市群, 空间扩展, 时空演变特征, 生态环境效应

中文引用格式: 方创琳, 高倩, 张小雷, 程卫国. 2019. 城市群扩展的时空演化特征及对生态环境的影响——以天山北坡城市群为例. 中国科学: 地球科学, 49: 1413–1424, doi: 10.1360/N072018-00251
英文引用格式: Fang C, Gao Q, Zhang X, Cheng W. 2019. Spatiotemporal characteristics of the expansion of an urban agglomeration and its effect on the eco-environment: Case study on the northern slope of the Tianshan Mountains. Science China Earth Sciences, 62: 1461–1472, https://doi.org/10.1007/s11430-2018-9369-x

© 2019 《中国科学》杂志社

1 引言

全球城镇化进程正在对生态环境造成日益严重的胁迫效应和深远影响，这种情况在人口高密度集聚的城市群地区尤为严峻. 城市群形成发育过程是城市之间由竞争转为合作的过程，城市群的形成发育与快速扩张给生态环境系统带来了巨大压力(Fang等，2016). 早在1995年联合国助理秘书长Wally N'Dow就在《城市化的世界》告诫: "城市化既可能成为无可比拟的未来之光明前景所在，也可能成为前所未有的灾难之凶兆，所以未来会怎样就取决于我们当今的所作所为"(Habitat, 1996). McMichael也指出: "城市化将以一种重要的形式危害人类的生存环境和健康. 城市群的扩张、工业的增长及其人口的增加，给当地水资源及生态环境带来许多压力"(McMichael等，2006). *Nature*在2003年发文论述了城市群扩张与城市化带来的用地扩张及其对气候变化的影响(Kalnay和Cai，2003), *Science*在2008年发表综述文章，阐述了全球大规模的城市化区域(即城市群地区)已经成为生态环境问题集中的焦点(Grimm等, 2008). 20世纪90年代以来, 很多学者开展了城市群地区城镇化与生态环境系统或要素之间耦合关系研究(Ren等，2003)，也有越来越多的学者从整体上解析城市群生态环境自然系统和城镇化人文系统交互作用的非线性耦合关系及耦合特征(Hull等，2015). 从国际上关于城市群地区城镇化与生态环境交互作用关系研究来看, 研究内容广泛, 主要涉及城市化对生态环境的胁迫与促进效应，生态环境对城市化的约束与承载效应，两者之间的耦合评价、机制、规律与模拟研究，城市建设用地增长、土地转移分布和土地利用结构调整对生态景观的影响研究等(Trusilova和Churkina, 2008; Deng等, 2009). 通过大量实证研究, 在城镇化与生态环境系统协调发展和模拟调控方面取得了新进展(王昕然等，2018; 匡文慧等，2017; Fang, 2015; Costantini和Monni, 2008; Kline等, 2001). 研究的学科视角众多，包括生态学、地理学、管理学、经济学、环境学等(Kennedy等，2011; Salim和Shafiei, 2014; Scholz和Binder, 2011). 研究案例区域涉及欧洲地区和美国、俄罗斯、中国等国家(Barbera等，2010; Alnawaiseh等，2015; Zanella等，2015; Bao和Fang, 2007)，且倾向于典型流域、生态脆弱区、城市化地区和大都市地区(Fang, 2015; 程维明等，2005; Zawar等，2010; Meerow和Newell, 2015). 研究尺度涵盖全球、国家、省(州)、城市和城市内部，并以城市为研究重点(Luo等，2009; Yang等，2015; Anderson和O'Farrell, 2012; Brown, 2012; 王宏伟等, 2006). 综观国际国内有关城市群扩张对生态环境影响的研究，目前尚未见到对地处西北边陲的天山北坡城市群扩展及生态环境效应问题的研究. 本文以天山北坡城市群为特例, 揭示天山北坡城市群建设用地扩展的特殊演变特征及其对脆弱生态环境的影响，旨在为城市群的可持续发展和生态环境保护提供科学依据.

发育在生态环境脆弱的绿洲地区的天山北坡城市群，其空间扩展过程有着不同于内地城市群的特殊驱动力，突出表现为城市群建设用地扩展受到资源开发驱动、兵地融合驱动、对口支援带动、民族团结促动等四大特殊驱动力的综合影响. 在内外部驱动力的共同作用下，天山北坡城市群成为国家"十三五"期间推动建设的19个城市群之一，成为重点建设的两个边疆地区城市群和丝绸之路经济带核心区建设的唯一一个城市群(Fang和Yu，2017). 今天是新疆城镇化水平最高、人口最密集、产业最集中的地区，未来是新疆新型城镇化的主体区和经济发展的战略核心区. 加快天山北坡城市群发展，对引领丝绸之路经济带核心区建设、保障国家经济安全与国防安全、确保新疆社会稳定和长治久安、促进兵地融合发展和区域协同发展都具有十分重大的战略意义(方创琳等，2011). 未来将天山北坡城市群建成丝绸之路经济带重要的战略支撑点、全国重要的战略资源加工储运基地、新疆城镇化与经济发展的核心引擎、边疆民族团结和兵地融合发展示范区(姚士谋等，2016). 天山北坡城市群建设用地扩展包含建设用地单向扩展和生态用地内部之间的交互置换两大方面，以外延型为主的建设用地扩展(张竟竟等, 2007; 张豫芳等, 2006)必然引起生态用地发生变化，生态用地的增减必然会对城市群的生态环境产生影响(陈曦等，2004; 赵万羽等，2008; 李松等，2013). 如何调控这种影响的合理程度和效应幅度，需要对城市群建设用地扩展与生态环境之间的影响机理进行分析(方创琳等，2010). 通过机理分析，提出与生态环境容量相适应的城市群建设用地扩展的合理规模，确保城市群实现可持续发展，进而为建设生态型城市群提供科学依据(方创琳和任宇飞，2017). 鉴于此，开展天山北坡城市群建设用地扩展及其对生态环境影响的研

究是未来10年国际地球系统科学与可持续性科学研究的热点和前沿领域, 也是绿色丝绸之路建设高度关注的优先研究主题.

2　研究范围与数据来源

2.1　研究范围

天山北坡城市群空间范围包括乌鲁木齐市、昌吉回族自治州、吐鲁番市和克拉玛依市全部、伊犁州奎屯市、塔城地区乌苏市及沙湾县, 以及规划范围内的新疆生产建设兵团第六师五家渠市及19个团场、第七师11个团场、第八师石河子市及14个团场、第十一师各建筑公司、第十二师7个团场, 共计3个地级市、6个县级市、12个市辖区、9个县、兵团5个师、51个团场. 城市群总面积21.54万平方公里, 占新疆的13%, 2016年底总人口814.35万人, 占新疆的33.96%, 其中城镇人口489.86万人, 占新疆的42.25%, 现价GDP 5981.27亿元, 占新疆的62.2%. 全社会固定资产投资4762.25亿元, 占新疆的47.69%. 是新疆今天和未来新型城镇化主体区和经济发展核心区.

2.2　数据来源

(1) 天山北坡城市群建设用地扩展的生态响应分析采用1980~2015年共七期1:10万土地利用数据为基础研究数据, 该数据集来源于中国科学院资源环境科学数据库(http://www.resdc.cn), 35年来各年份二级类型土地利用结构变化分析图见图1. 根据研究目标, 将土地利用分类体系的6个一级类型划分为两大类: 一类是建设用地, 包括居民点及工矿用地体系下的城镇用地、农村居民点、其他建设用地3小类; 一类是生态用地, 包括林地、草地、水域、耕地和未利用土地5类. 参照西北干旱区生态价值贡献率赋值方法(李晓文等, 2003), 分别对24个土地利用二级类型的生态价值指数进行赋值(表1), 重点研究城市群建设用地扩展载体——城镇用地、农村居民点、其他建设用地类型及其变化对生态环境的影响.

(2) 城市群用地转换的生态价值贡献采用1980年、2000年和2015年天山北坡城市群变化的土地利用数据, 基于GIS方法, 首先将不同年份各用地层从栅格数据库中分离出来单独作为一层; 其次转化为矢量格式, 将不同年份各用地层叠加, 求出变化的土地利用类型范围, 并判定不同用地类型之间的转化幅度、转换关系及其对生态环境的影响.

3　研究方法

3.1　城市群建设用地扩展的生态价值变化及贡献率计算方法

天山北坡城市群建设用地扩展对生态价值的影响采用生态价值变化指数和用地变动的生态价值贡献率计算. 其中:

(1) 城市群扩展的用地生态价值变化指数. 反映天山北坡城市群扩展带来的各用地类型的生态价值变化量, 同时反映各用地类型对天山北坡城市群生态价值总量的贡献率(王思远等, 2001; 徐立等, 2009).

$$\mathrm{Ev}_i = \mathrm{LU}_i C_i, \tag{1}$$

$$\mathrm{Evr}_i = \frac{\mathrm{LU}_i C_i}{\sum_{i=1}^{24} \mathrm{LU}_i C_i} \times 100\%, \tag{2}$$

式中, LU_i为研究期内天山北坡城市群各类用地的面积, C_i为各类用地i的生态价值贡献率; Evr_i则为各类用地i的生态价值贡献率.

(2) 城市群扩展的生态价值贡献率. 不考虑生态价值的年际变化, 只考虑研究期间内同一用地类型的生态价值变动情况及其占天山北坡城市群生态价值变动总量, 即贡献率. 若令$\mathrm{Ev}_{i\max}$和$\mathrm{Ev}_{i\min}$分别为某一土地利用类型某一时段内的最大生态价值和最小生态价值, 则用地变动的生态价值贡献率指数计算公式为

$$\mathrm{Lecv}_i = \frac{(\mathrm{Ev}_{i\max} - \mathrm{Ev}_{i\min})}{\sum_{i=1}^{24} (\mathrm{Ev}_{i\max} - \mathrm{Ev}_{i\min})} \times 100\%. \tag{3}$$

3.2　城市群用地转换的生态价值及贡献率计算方法

天山北坡城市群用地转换的生态价值及贡献率计算采用城市群用地类型的变化率指数、土地利用变更的生态贡献率指数和土地利用类型的流向指数等指标体现.

(1) 城市群用地类型的变化率指数. 该指数测度不同用地类型的变动强度及类型间的差异(刘盛和和何书金, 2002; 姜广辉等, 2006), 可分析天山北坡城市群

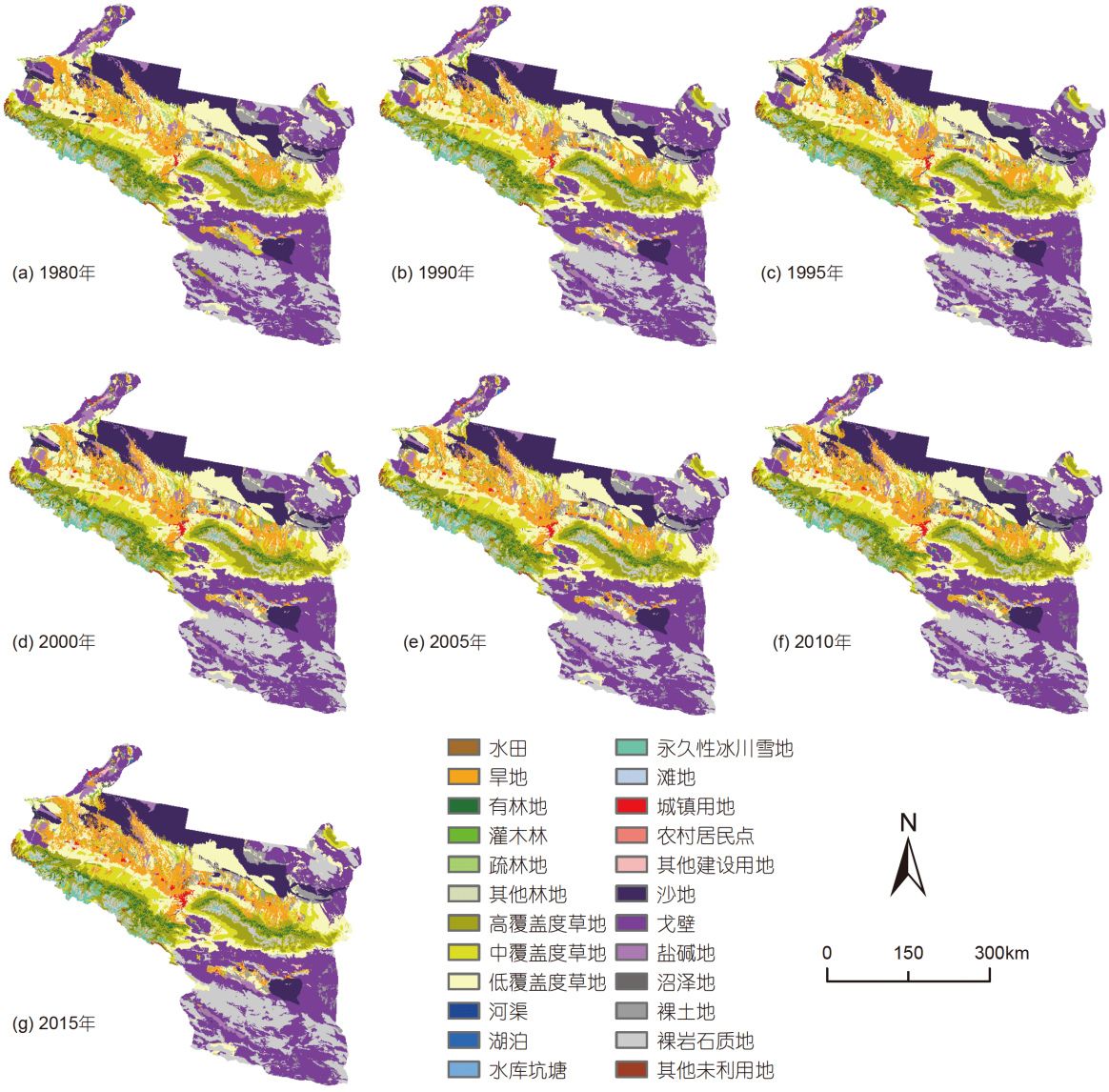


图 1　1980~2015年天山北坡城市群扩展的土地利用结构变化示意图

建设用地扩展阶段的用地变动特征与机制.

$$K_i = \frac{\mathrm{LU}_{it_1} - \mathrm{LU}_{it_0}}{\mathrm{LU}_{it_0}} \times \frac{1}{T}, \tag{4}$$

式中, K_i为研究时段内某一种生态用地类型的变化率, LU_{it_0}和LU_{it_1}分别表示研究初期和末期不同生态用地类型i的面积, T代表研究时段.

(2) 城市群用地变更的生态贡献率指数. 是指特定时段内某一种土地利用类型变化所导致的生态价值改变. 在具体应用中, 可以通过地图代数、土地利用转移矩阵分离与城镇用地、农村居民点和其他建设用地有关的建设用地变化类型, 进一步分析城市群扩展的生态环境影响及区域生态环境变化的主导因素. 其表达式为

$$\mathrm{Ecr}_{i\to j} = \frac{\mathrm{LU}_{i\to j}C_j - \mathrm{LU}_{i\to j}C_i}{\mathrm{LU}_{it}C_i}, \tag{5}$$

$$\mathrm{Recr}_{ij} = \frac{\mathrm{LU}_{i\to j}C_j - \mathrm{LU}_{i\to j}C_i}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{LU}_{it}C_i} = \frac{\mathrm{LU}_{i\to j}\left(C_j - C_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{LU}_{it}C_i}, \tag{6}$$

表 1　天山北坡城市群不同土地利用类型的生态价值赋值表

一级类型	编号	二级类型	生态价值赋值
耕地	11	水田	0.30
	12	旱地	0.25
林地	21	有林地	0.95
	22	灌木林	0.65
	23	疏林地	0.45
	24	其他林地	0.40
草地	31	高覆盖度草地	0.75
	32	中覆盖度草地	0.45
	33	低覆盖度草地	0.20
水域	41	河渠	0.55
	42	湖泊	0.75
	43	水库坑塘	0.55
	44	永久性冰川雪地	0.90
	46	滩地	0.55
居民点及工矿用地	51	城镇用地	0.20
	52	农村居民点	0.20
	53	其他建设用地	0.15
未利用土地	61	沙地	0.01
	62	戈壁	0.01
	63	盐碱地	0.05
	64	沼泽地	0.65
	65	裸土地	0.05
	66	裸岩石质地	0.01
	67	其他未利用地	0.08

式中，$Ecr_{i\to j}$表示土地利用类型转为非i类(j类，j=1，2，3…，n)土地利用类型所引起的生态价值变化占i类土地生态价值的比重，$LU_{i\to j}$为研究期内i用地类型转化为非i类(j类，j=1，2，3…，n)土地利用类型的面积，$Recr_{ij}$则表示土地利用类型转为非i类(j类，j=1，2，3…，n)土地利用类型所引起的生态价值变化占区域生态价值的比重．LU_i为研究期内生态用地类型的面积，C_i为生态用地类型i的生态价值贡献率；C_j为生态用地类型j的生态价值贡献率．

(3) 城市群用地类型的流向指数．通过分析特定利用类型的流出类型来揭示天山北坡城市群土地利用变化的动因．该方法涉及的指数是各流出类型面积占该分析类型面积的百分比(流向百分比)，而流向百分比的求算可依据土地利用类型的转移矩阵(朱会义和李秀彬, 2003)．

$$Pc_i=\frac{\Delta LU_{i-j}}{LU_i}\times 100\%, \tag{7}$$

$$Rpc_i=\frac{\Delta LU_{i-j}}{\sum_{i=1}^{n}LU_i}\times 100\%, \tag{8}$$

式中，LU_i表示研究初期不同生态用地类型i的面积，ΔLU_{i-j}为研究时段内i类用地转为非i类(j类，j=1，2，3…，n)用地类型的面积．Pc_i表示在某一分析类型范围内的流向比例，Rpc_i表示在所有用地类型范围内的流向比例．

4 结果分析

4.1 城市群草地对生态价值的影响最大, 工矿居民点用地的影响很低

采用式(1)和(2)计算表明, 近35年来天山北坡城市群草地对生态价值的影响最大, 草地生态价值贡献率年均高达66.27%(图2), 是天山北坡城市群生态价值的最主导贡献类型, 其生态价值贡献率基本保持稳定, 年际变化幅度仅5%. 未来城市群建设用地扩展要尽量不侵占中、高覆盖度草地, 以免引起生态价值的锐减.

除草地外, 1980~2015年, 林地、耕地、水域和未利用地对天山北坡城市群生态价值的影响也较大, 生态价值贡献率在4.22~11.09%区间. 有林地是林地生态价值贡献率最大的子类型, 平均值为9.05%, 灌木林等3种林地子类型平均贡献率均不超过1%. 在耕地用地中, 水田和旱地的平均生态价值贡献率分别为0.10%和10.29%. 永久性冰川雪地则是城市群水域用地的主导子类型, 平均贡献率为6.26%, 湖泊、水库坑塘和滩地3子类的平均贡献率和为0.96%, 河渠平均贡献率近乎为0. 未利用地的生态价值贡献率平均为4.22%, 其中戈壁平均贡献率为1.26%, 裸土地等6种子类型均不超过0.8%. 这种差异性变化告诉我们, 要特别重视利用好天山北坡城市群永久性冰川雪地、有林地、旱地产生的生态价值, 避免空间扩张对生态环境产生不利影响. 再从35年的年际变化来看, 耕地生态价值贡献率的变化率高达24%, 林地、水域和未利用土地分别为6%、5%和5%. 说明天山北坡城市群扩展导致耕地生态价值变化相对剧烈, 林地虽年际变动幅度较小, 但由于其生态价值占总量的11%, 其“正向”生态贡献率不容忽视.

进一步分析天山北坡城市群城乡居民点及工矿用地增加对生态价值的影响, 发现城乡居民点及工矿用地增加带来的生态价值贡献率极低, 平均仅为0.82%, 为六类一级用地最小值. 但其年际变化幅度最强, 生态价值贡献率由1980年的0.53%提升至2015年的1.23%, 变化幅度达86%. 说明居民点及工矿用地作为天山北坡城市群扩展主要载体的变化相当剧烈, 但限于该用地类型的面积占比低, 用地扩展的“正向”生态价值平均贡献率很低.

4.2 城市群建设用地扩展引起用地类型变动对生态价值影响的差异很大

1980~2015年, 天山北坡城市群建设用地面积由1067km^{2}扩展至2586km^2, 建设用地与生态用地的此消彼长共同影响生态环境的价值变动. 采用式(3)计算表明, 不同用地类型的生态价值贡献率差异很大, 介于0.1~35%(见表2). 低覆盖度草地和旱地类型变动对生态价值影响最大, 贡献率合计高达59%. 其次为中覆盖度草地、戈壁、城镇用地变动贡献率在3~8%, 其他19种用地类型变动对生态价值贡献率在3%以下, 湖泊等8种用地类型贡献率指数皆不足1%.

各种用地类型内部的变动带来的生态价值影响差

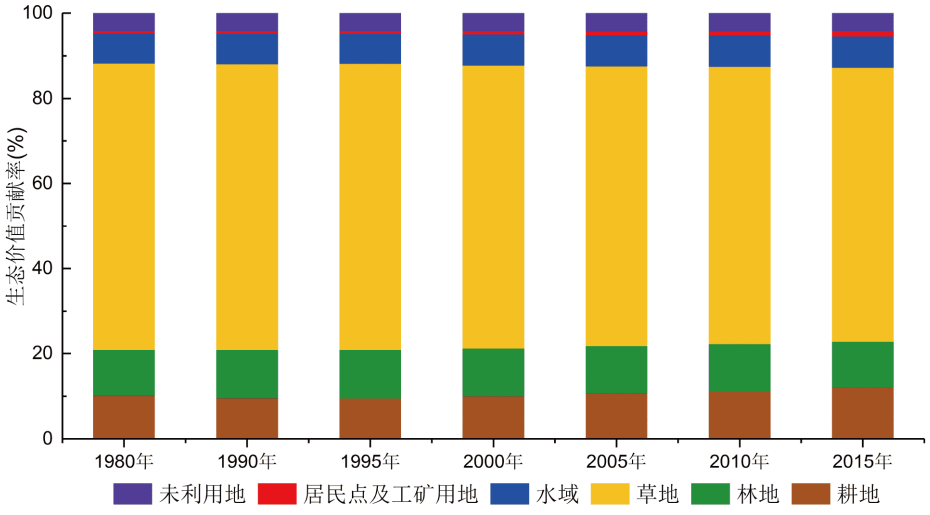


图 2 1980~2015年天山北坡城市群不同用地类型变化对生态价值的影响及年际变化图

表 2　1980~2015年天山北坡城市群不同用地类型变动对生态价值的影响

用地类型	用地变动对生态价值的贡献率(%)	用地类型	用地变动对生态价值的贡献率(%)
低覆盖度草地	34.54	其他建设用地	1.49
旱地	24.76	永久性冰川雪地	1.28
中覆盖度草地	7.44	滩地	1.28
戈壁	4.78	盐碱地	1.17
城镇用地	3.29	湖泊	0.96
高覆盖度草地	2.98	裸土地	0.85
灌木林	2.55	其他林地	0.64
沼泽地	2.55	裸岩石质地	0.64
疏木林	2.34	水田	0.32
农村居民点	2.02	沙地	0.10
水库坑塘	1.91	河渠	0.10
有林地	1.91	其他未利用地	0.10

异也很大. 如耕地用地中旱地变动贡献率超过24%, 而水田仅为0.32%; 低覆盖度草地(34.54%)明显高于中、高覆盖度草地类型; 戈壁(4.78%)则为未利用地变动贡献率最大的子类型, 沙地与其他未利用地贡献率均仅为0.11%. 有林地等4种林地用地和城镇用地等3种居民点及工矿用地变动对生态价值的贡献率差异值仅在1~3%左右, 湖泊等5种水域用地变动的贡献率指数差异值在0.1~2%.

4.3　用地规模比重变化较大的类型是水域、未利用地、林地和居民点及工矿用地

采用公式(4)计算表明, 1980~2000年天山北坡城市群各用地面积变化率超过30%的有4种用地类型, 包括河渠(100%)、沼泽地(70.33%)、湖泊(47.06%)、其他林地(32.73%), 各用地变动面积分别为7、128、64和36km^2(图3a). 这些用地是对城市群生态环境影响贡献相对较小的用地类型, 各年际平均生态价值贡献率均不超过26%. 到了2000~2015年(图3b), 天山北坡城市群各用地面积变化率超过30%的仍有4种用地类型, 包括其他建设用地(185.04%)、沼泽地(103.74%)、城镇用地(66.55%)、其他林地(57.28%). 各用地变动面积分别为507、111、368和59km^2. 这些用地仍是对天山北坡城市群生态环境影响贡献相对较小的用地类型, 各年际平均生态价值贡献率均不超过29%. 由此可知, 天山北坡城市群用地规模比重发生明显变化的是对生态环境影响贡献相对小的水域、未利用地、林地和居民点及工矿用地. 而生态环境影响贡献率较大的草地和耕地类型, 其面积相对变化量占比值较小.

4.4　城市群生态用地转化为建设用地的规模较大

从生态用地转化为建设用地的变化情况分析(见图4), 生态用地转化为建设用地的规模较大. 1980~2000年和2000~2015年两个时段, 生态用地向建设用地的转化量分别为718和967km^2, 占城市群用地变动总面积的5.50%和16.94%. 其中, 生态用地向城镇用地转化量分别达282和367km^2, 向农村居民点用地转化量分别达347和102km^2, 向其他建设用地转化量分别达89和498km^2. 建设用地规模增加由前期以农村居民点用地为主体演变为后期主要向其他建设用地的转化. 近35年来, 天山北坡城市群69.91%的建设用地扩展由生态用地类型中的耕地和草地转变而来; 仅旱地和低覆盖度草地转变面积达1082km^2, 占生态用地向建设用地转变总量的64.21%. 2000年以来至城市群扩展后期, 戈壁(172km^2)、裸土地(65km^2)、盐碱地(65km^2)等未利用地类型向其他建设用地转化比重明显增加, 占生态用地转变为建设用地总量的近1/3.

相反, 天山北坡城市群建设用地转化为生态用地类型的规模很小. 从图5可以看出, 1980~2000年和2000~2015年两个时段, 建设用地仅向生态用地转变147和19km^2, 分别占用地变动总面积的1.13%和0.33%. 农村居民点转化为旱地始终是该过程的主体

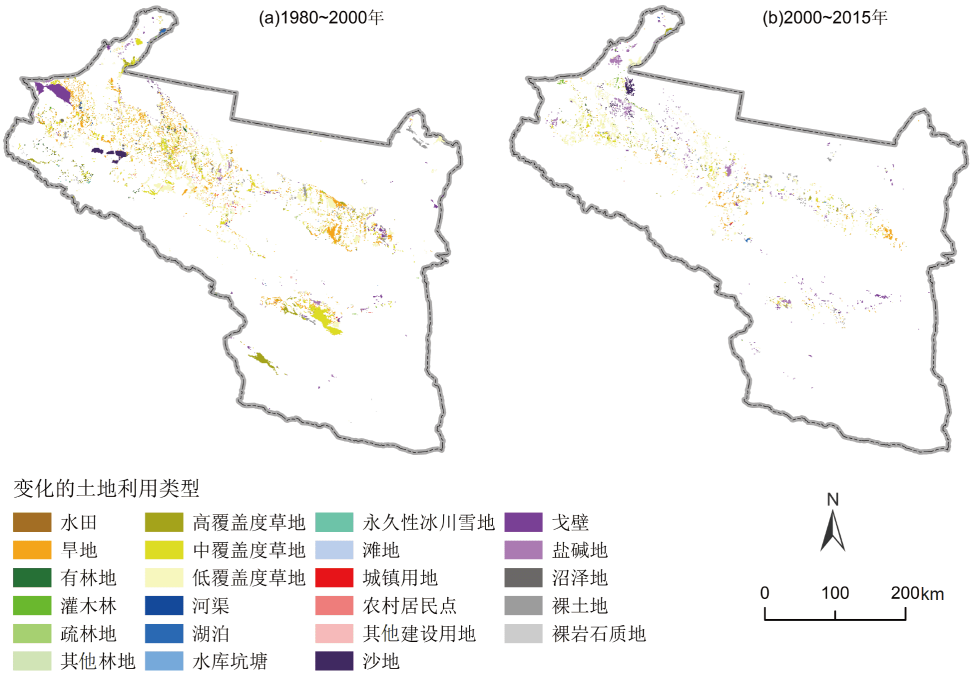


图 3　1980~2015年天山北坡城市群用地转换的土地利用类型变化示意图

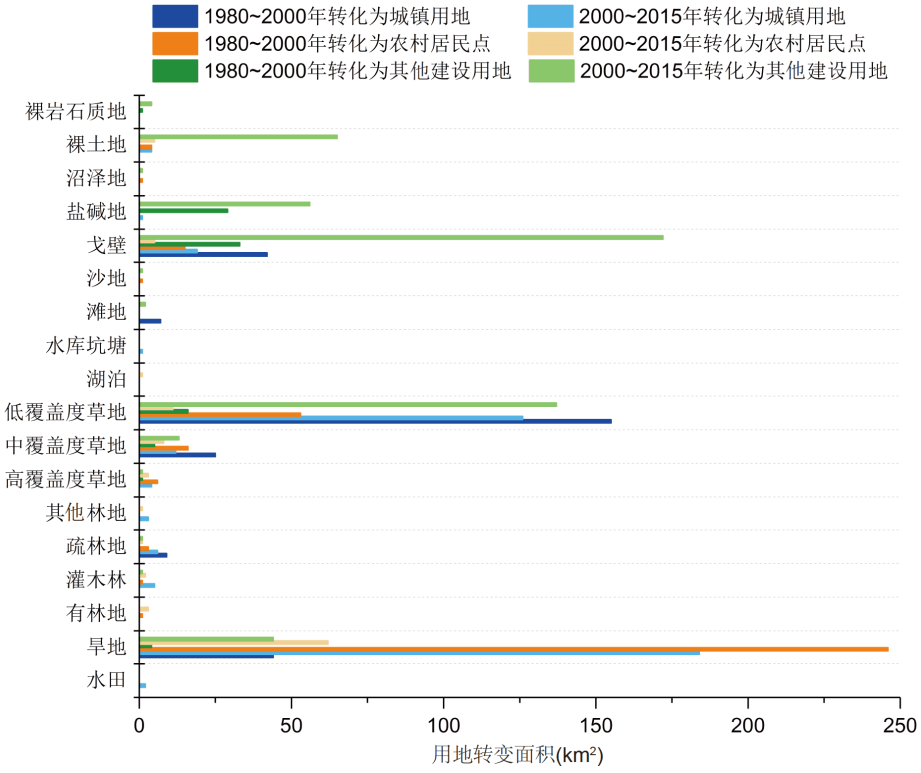


图 4　天山北坡城市群生态用地转化为建设用地的规模示意图

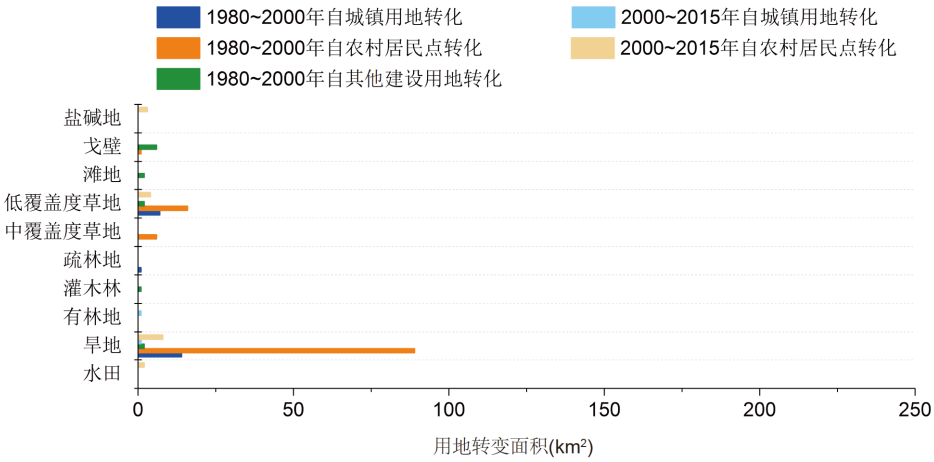


图 5　天山北坡城市群建设用地转化为生态用地的规模示意图

变动类型，且后期未发生其他建设用地向生态用地转化.

4.5　城市群建设用地重点扩展区在乌鲁木齐、克拉玛依和昌吉3市

从天山北坡城市群建设用地扩展的差异性分析，重点扩展地区集中在乌鲁木齐市、克拉玛依市和昌吉市，上述3市建设用地处于大规模扩张的态势，扩展面积分别达到399、186和126km^2. 鄯善县、奇台县和阜康市的该类用地在经济发展驱动下也处于较快扩张的状态. 其中, 乌鲁木齐市、昌吉市、石河子市以城镇用地为主导扩展类型；克拉玛依市、鄯善县、奇台县、阜康市、吉木萨尔县、高昌区(2015年撤县设区前为原吐鲁番市)、五家渠市等以其他建设用地为主导扩展类型. 建设用地快速扩展区集中在奎屯市、托克逊县和乌苏市. 从居民点及工矿用地的面积变化率指数分析，上述3市处于快速扩展态势，扩展变化率指数分别达到2.47%、2.12%和1.9%. 昌吉市、鄯善县、乌鲁木齐市、吉木萨尔县、五家渠市的居民点及工矿用地变化率指数也均高于天山北坡城市群平均值1.17%.

4.6　城市群建设用地扩展对生态环境造成负面影响

(1) 少数几个土地利用类型变更影响着天山北坡城市群扩展的生态价值. 前期(1980~2000年)导致生态价值下降的主要变化过程发生在旱地-农村居民点、中覆盖度草地-城镇用地之间的类型变更，后期(2000~2015年)则发生在旱地-城镇用地、低覆盖度草地-其他建设用地之间的类型变更；前期生态环境改善过程的主要类型为戈壁向城镇用地、其他建设用地转换，后期变更为戈壁、裸土地、盐碱地向其他建设用地的转换. 1980~2015年，大部分城市后期扩展导致生态质量下降. 昌吉市、奎屯市和玛纳斯县生态价值下降幅度加剧, 高昌区生态价值提升幅度明显.

(2) 城市群扩展对生态环境造成负面影响，后期(2000~2015年)建设用地扩展的生态价值较前期(1980~2000年)有明显改善效应. 1980~2000年，除鄯善县由于土地整理带来生态价值提高以外，其他所有城市生态价值变动均表现为负值；近15年以来，鄯善县等7城市生态价值变动表现为正值，其他10县市该项指标仍为负值(见表3). 其中，高昌区、克拉玛依市、托克逊县、吉木萨尔县、阜康市、木垒哈萨克自治县的生态价值变动由负值变更为正值, 均增幅显著; 乌鲁木齐市和奇台县虽后期生态价值变动值仍为负值，但增幅量较大. 值得注意的是，五家渠市、奎屯市、昌吉市、乌苏市和沙湾县5城市后期对生态环境的破坏作用要更大，建设用地扩展引起城市生态价值的持续下降，奎屯市建设用地扩展对生态环境破坏的加剧程度尤为明显.

(3) 各城市建设用地扩展引起单位土地面积生态价值变动的地区差异较大. 生态价值变动高值区域始终为工业化水平相对较高的奎屯市和兵团城市石河子、五家渠市，前期与后期该指标值大小区间为[−332.3, −104.9]、[−270.0, −198.2], 且奎屯市和五家

表 3　1980~2015年天山北坡城市群及各城市建设用地扩展导致的生态价值变化情况统计表

地区名称	1980~2000年	2000~2015年	地区名称	1980~2000年	2000~2015年
乌鲁木齐市	−16.42	−0.81	奇台县	−17.18	−1.67
昌吉市	−18.1	−26.7	沙湾县	−22.7	−28.55
阜康市	−15.28	9.03	木垒哈萨克自治县	−16.75	7.28
高昌区	−15.51	20.48	鄯善县	2.7	24.04
呼图壁县	−18.1	−13	石河子市	−15.25	−12.3
吉木萨尔县	−13.28	11.99	托克逊县	−6.52	12.24
克拉玛依市	−5.35	19.83	乌苏市	−25.25	−27.2
奎屯市	−12.3	−25.85	五家渠市	−12.3	−14.65
玛纳斯县	−23.16	−19.65	天山北坡城市群	−250.75	−65.49

渠市的生态价值有降低态势. 其他14个城市建设用地扩展引起的生态价值变动值均在[−25.3, 0.7]、[−33.5, 25.6]范围内, 且后期扩展对生态价值提升有一定程度的贡献.

5　讨论与结论

城市群作为新型城镇化的空间主体, 其形成发育与空间扩展对生态环境造成了显著影响, 这种影响对于地处生态环境脆弱的天山北坡城市群更为明显. 天山北坡城市群是国家推动建设的丝绸之路经济带核心区唯一一个城市群, 2019年5月8日由国家发改委批复实施的《天山北坡城市群发展规划(2018~2035)》明确提出, 未来将天山北坡城市群建成丝绸之路经济带重要的战略支撑点、全国重要的战略资源加工储运基地、新疆城镇化与经济发展的核心引擎、边疆民族团结和兵地融合发展示范区. 本文以天山北坡城市群为例, 揭示了在资源开发驱动、兵地融合驱动、对口支援带动、民族团结促动等四大特殊驱动力综合影响下天山北坡城市群扩展对脆弱生态环境的影响, 旨在为城市群的可持续发展和生态环境保护提供科学依据.

(1) 天山北坡城市群建设用地扩展对生态环境造成了显著影响. 采用1980~2015年土地利用遥感监测数据分析发现, 草地是对天山北坡城市群生态环境影响最大的用地类型, 生态价值贡献率年均高达66.27%, 且基本保持稳定, 年际变化幅度只有5%; 城乡居民点及工矿用地变动对生态环境的影响很小, 生态价值贡献率很低(0.82%), 但年际变化幅度很大(85%). 耕地生态价值贡献率的年际变化率高达24%, 说明城市群扩展导致耕地的生态价值变化相对剧烈. 35年来城市群建设用地扩展面积由1067km^{2}扩展至2586km^2, 各用地类型内部的变动对生态环境的影响差异很大, 变动幅度最大的是低覆盖度草地和旱地, 贡献率合计高达59%. 用地比重变化较大的类型是对生态贡献较小的水域、未利用地、林地和居民点及工矿用地.

(2) 天山北坡城市群生态用地转化为建设用地的规模较大, 建设用地转化为生态用地的规模很小. 从近35年用地变更情况分析, 生态用地转化为建设用地的规模多达1685km^2, 其中69.91%来自于耕地和草地, 仅旱地和低覆盖度草地转变面积达1082km^2, 占生态用地向建设用地转变总量的64.21%, 2000年以来至城市群扩展后期, 戈壁(172km^2)、裸土地(65km^2)、盐碱地(65km^2)等未利用地向建设用地转化比重明显增加. 而建设用地转化为生态用地的规模仅不到166km^2. 城市群后期(2000~2015年)扩展与用地变更对生态环境的积极影响较前期(1980~2000年)更为明显. 城市群内部建设用地重点扩展区在乌鲁木齐、克拉玛依和昌吉3市, 扩展面积分别达到399、186和126km^2, 快速扩展区为奎屯、托克逊和乌苏3县市, 扩展变化率指数分别达到2.5%、2.1%和1.9%. 奎屯市、石河子市和五家渠市属于单位土地面积的生态价值变动高值区, 其他14城市建设用地扩展造成的生态价值变动幅度相对较轻且后期扩展有一定程度减缓.

(3) 天山北坡城市群建设用地扩展需要充分考虑脆弱生态环境的敏感性和承载力. 城市群发育于干旱脆弱的生态环境中, 短缺的水资源是制约天山北坡城市群可持续发展的最主要瓶颈, 随着天山北坡城市群集聚效应的进一步提升、经济社会的进一步发展和人

口及产业的进一步集聚，未来发展面临的生态环境约束将日益加大，生态环境保护的任务将更加艰巨. 为此，需要进一步加强研究天山北坡城市群的水资源承载力和生态环境承载力，以可容许的水资源与生态环境容量调控天山北坡城市群的人口与产业集聚规模，降低城市群扩展对生态环境的压力，提升城市群发展的可持续性.

参考文献

程维明, 周成虎, 刘海江, 张旸, 蒋艳, 张一驰, 姚永慧. 2005. 玛纳斯河流域50年绿洲扩张及生态环境演变研究. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 1074–1086

陈曦, 罗格平, 夏军, 周可法, 娄少平, 叶民权. 2004. 新疆天山北坡气候变化的生态响应研究. 中国科学D辑: 地球科学, 34: 1166–1175

方创琳, 宋吉涛, 蔺雪芹. 2010. 中国城市群可持续发展理论与实践. 北京: 科学出版社. 56–89

方创琳, 姚士谋, 刘盛和. 2011. 2010中国城市群发展报告. 北京: 科学出版社. 25–33

方创琳, 任宇飞. 2017. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析. 中国科学: 地球科学, 47: 833–846

姜广辉, 张凤荣, 孔祥斌, 赵华甫, 陈军伟, 苏子友. 2006. 北京山区建设用地扩展空间分异分析. 地理研究, 25: 905–912

匡文慧, 杨天荣, 刘爱琳, 张弛, 陆灯盛, 迟文峰. 2017. 城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity)研究——以北京城市为例. 中国科学: 地球科学, 47: 847–859

李松, 张小雷, 李寿山, 杜宏茹. 2013. 新疆绿洲城市土地利用景观格局时空演化及驱动力研究. 经济地理, 33: 161–168

李晓文, 方创琳, 黄金川, 毛汉英. 2003. 西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应. 第四纪研究, 23: 281–290

刘盛和, 何书金. 2002. 土地利用动态变化的空间分析测算模型. 自然资源学报, 17: 533–540

王宏伟, 张小雷, 魏山峰, 康宏. 2006. 乌鲁木齐市经济发展与生态环境交互耦合的规律性分析. 中国科学D辑: 地球科学, 50: 140–147

王思远, 刘纪远, 张增祥, 周全斌, 赵晓丽. 2001. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 56: 631–639

王昕然, 贺晓冬, 苗世光, 窦有俊. 2018. 气溶胶辐射效应对城市边界层影响的数值模拟研究. 中国科学: 地球科学, 48: 1478–1493

徐立, 刘少博, 刘云国, 吴际友, 努扎艾提·艾比布, 宋华晓, 陈贝贝. 2009. 湘中红壤丘陵区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长沙市为例. 环境科学学报, 29: 1788–1792

姚士谋, 周春山, 王德, 修春亮, 王成新, 陈明星. 2016. 中国城市群新论. 北京: 科学出版社. 14–15

张竟竟, 杨德刚, 张豫芳, 陈正江. 2007. 基于GIS与分形理论的天山北坡城乡空间演变综合研究. 资源科学, 29: 83–89

张豫芳, 杨德刚, 张小雷, 马文红, 张宏远. 2006. 天山北坡绿洲城市空间形态时空特征分析. 地理科学进展, 25: 138–147

赵万羽, 李建龙, 陈亚宁. 2008. 天山北坡区域生态承载力与可持续发展——以阜康市为例. 生态学报, 28: 4363–4371

朱会义, 李秀彬. 2003. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 58: 643–650

Alnawaiseh N A, Hashim J H, Md Isa Z. 2015. Relationship between vehicle count and particulate air pollution in Amman, Jordan. Asia Pac J Public Health, 27: NP1742–NP1751

Anderson P M L, O'Farrell P J. 2012. An ecological view of the history of the city of Cape Town. Ecol Soc, 17: 12

Bao C, Fang C L. 2007. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China. Ecol Econ, 62: 508–517

Barbera E, Currò C, Valenti G. 2010. A hyperbolic model for the effects of urbanization on air pollution. Appl Math Model, 34: 2192–2202

Brown A. 2012. Scenario analysis: Urbanization emissions. Nat Clim Change, 2: 394

Costantini V, Monni S. 2008. Environment, human development and economic growth. Ecol Econ, 64: 867–880

Deng J S, Wang K, Hong Y, Qi J G. 2009. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. Landscape Urban Plan, 92: 187–198

Fang C L. 2015. Important progress and future direction of studies on China's urban agglomerations. J Geogr Sci, 25: 1003–1024

Fang C L, Liu H M, Li G D. 2016. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment. J Geogr Sci, 26: 1081–1116

Fang C L, Yu D L. 2017. Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. Landscape Urban Plan, 162: 126–136

Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. 2008. Global change and the ecology of cities. Science, 319: 756–760

Habitat U. 1996. An Urbanizing World, Global Report on Human Settlements. Nairobi: UN Human Settlements Programme

Hull V, Tuanmu M N, Liu J. 2015. Synthesis of human-nature feedbacks. Ecol Soc, 20: 17

Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 423: 528–531

Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. 2011. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environ Pollut, 159: 1965–1973

Kline J D, Moses A, Alig R J. 2001. Integrating urbanization into landscape-level ecological assessments. Ecosystems, 4: 3–18

Luo H B, Huang G, Wu X M, Peng J, Fu X Y, Luo L. 2009. Ecological

engineering analysis and eco-hydrodynamic simulation of tidal rivers in Shenzhen City of China. Ecol Eng, 35: 1129–1137

McMichael A J, Woodruff R E, Hales S. 2006. Climate change and human health: Present and future risks. Lancet, 367: 859–869

Meerow S, Newell J P. 2015. Resilience and complexity: A bibliometric review and prospects for industrial ecology. J Ind Ecol, 19: 236–251

Ren W W, Zhong Y, Meligrana J, Anderson B, Watt W E, Chen J K, Leung H L. 2003. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai. Environ Int, 29: 649–659

Salim R A, Shafiei S. 2014. Urbanization and renewable and non-renewable energy consumption in OECD countries: An empirical analysis. Econ Model, 38: 581–591

Scholz R W, Binder C R. 2011. Environmental Literacy in Science and Society: From Knowledge to Decisions. Cambridge: Cambridge University Press. 453–462

Trusilova K, Churkina G. 2008. The response of the terrestrial biosphere to urbanization: Land cover conversion, climate, and urban pollution. Biogeosciences, 5: 1505–1515

Yang L, Ouyang H, Fang K N, Ye L L, Zhang J. 2015. Evaluation of regional environmental efficiencies in China based on super-efficiency-DEA. Ecol Indic, 51: 13–19

Zanella A, Camanho A S, Dias T G. 2015. The assessment of cities' livability integrating human wellbeing and environmental impact. Ann Oper Res, 226: 695–726

Zawar R P, Appelhans T, Gharaylou M, Shamsipour A. 2010. Mesoscale controls on particulate matter pollution for a mega city in a semi-arid mountainous environment: Tehran, Iran. Int J Environ Pollut, 41: 166–183

(责任编委: 陈利顶)