中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 8 期: 1083 ~ 1105
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

生态环境曲面建模基本定理及其应用

岳天祥[1,2,3,22*], 赵娜[1,2,22], 刘羽[4], 王轶夫[5], 张斌[6], 杜正平[1], 范泽孟[1,2,22†], 史文娇[1,2], 陈传法[4], 赵明伟[7], 宋敦江[8], 王世海[1], 宋印军[1], 闫长青[9], 李启权[10], 孙晓芳[11], 张丽丽[12], 田永中[13], 王薇[14], 王英安[15], 马胜男[16], 黄宏胜[3], 卢毅敏[17], 王情[18], 王晨亮[1], 王玉柱[19], 鹿明[20], 周伟[1,13,21], 刘熠[1,2], 尹笑哲[1], 王宗[1,2], 包正义[1,2], 赵苗苗[1,2], 赵亚鹏[1,2], 焦毅蒙[1,2], Ufra NASEER[1,2], 范斌[1,2], 李赛博[1,2], 杨阳[1,2], John P. WILSON[1,2,23]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100149;
3. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045;
4. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590;
5. 北京林业大学林学院, 北京 100083;
6. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637002;
7. 滁州学院地理信息与旅游学院, 滁州 239000;
8. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190;
9. 山东科技大学信息工程系, 青岛 266590;
10. 四川农业大学资源学院, 成都 611130;
11. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 日照 276828;
12. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
13. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;
14. 国家减灾中心卫星遥感部, 北京 100721;
15. 中国人口与发展研究中心人口数据部, 北京 100081;
16. 国家标准化管理委员会工业二部, 北京 100088;
17. 福州大学数字中国研究院, 福州 350002;
18. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100021;
19. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083;
20. 钱学森空间技术实验室, 北京 100094;
21. 重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074;
22. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;
23. Spatial Sciences Institute, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-0374, USA

* 通讯作者, E-mail: yue@lreis.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: fanzm@lreis.ac.cn

中文引用格式: 岳天祥, 赵娜, 刘羽, 王轶夫, 张斌, 杜正平, 范泽孟, 史文娇, 陈传法, 赵明伟, 宋敦江, 王世海, 宋印军, 闫长青, 李启权, 孙晓芳, 张丽丽, 田永中, 王薇, 王英安, 马胜男, 黄宏胜, 卢毅敏, 王情, 王晨亮, 王玉柱, 鹿明, 周伟, 刘熠, 尹笑哲, 王宗, 包正义, 赵苗苗, 赵亚鹏, 焦毅蒙, Naseer U, 范斌, 李赛博, 杨阳, Wilson J P. 2020. 生态环境曲面建模基本定理及其应用. 中国科学: 地球科学, 50: 1083–1105, doi: 10.1360/SSTe-2019-0164

英文引用格式: Yue T, Zhao N, Liu Y, Wang Y, Zhang B, Du Z, Fan Z, Shi W, Chen C, Zhao M, Song D, Wang S, Song Y, Yan C, Li Q, Sun X, Zhang L, Tian Y, Wang W, Wang Y, Ma S, Huang H, Lu Y, Wang Q, Wang C, Wang Y, Lu M, Zhou W, Liu Y, Yin X, Wang Z, Bao Z, Zhao M, Zhao Y, Jiao Y, Naseer U, Fan B, Li S, Yang Y, Wilson J P. 2020. A fundamental theorem for eco-environmental surface modelling and its applications. Science China Earth Sciences, 63: 1092–1112, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9594-3

© 2020 《中国科学》杂志社

收稿日期: 2019-07-28; 收修改稿日期: 2020-02-04; 接受日期: 2020-02-25; 网络版发表日期: 2020-04-21
国家自然科学基金项目(批准号: 41930647、41590844、41421001、41971358)、中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA20030203)、资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目及生态环境部生物多样性调查、观测和评估项目(2019~2023年)资助

摘要 在高精度曲面建模方法和地球表层系统建模基本定理研究结果基础上, 演绎提出了生态环境曲面建模基本定理. 以京津冀地区为案例, 对基于生态环境曲面建模基本定理的空间升尺度、空间降尺度、空间插值、数据融合和模型-数据同化等算法进行了实证研究, 与传统算法精度进行了比较分析. 结果表明, 由于基于生态环境曲面建模基本定理的各种算法综合了外蕴量信息和内蕴量信息, 同时运用了理论上完善的信息综合方法, 使海拔高度曲面的升尺度均方根误差至少降低了9m, 年平均气温未来情景的降尺度精度至少提高16%, 年平均气温过去变化趋势的数据融合精度至少提高70%, 年平均降雨量过去变化趋势的空间插值精度至少提高0.2%, 碳储量的模型-数据同化精度提高了40%. 文章最后讨论了生态曲面建模基本定理亟待解决的五大理论问题和四大应用基础问题.

关键词 高精度曲面建模, 生态环境曲面建模基本定理, 空间升尺度, 空间降尺度, 空间插值, 数据融合, 模型-数据同化, 模型耦合

1 引言

1.1 经典曲面建模方法

生态环境要素的格网化表达可抽象为数学“曲面”(岳天祥等, 2004; Yue等, 2007). 20世纪50年代初以来, 相继诞生了各种曲面建模方法. 南非矿业工程师Krige(1951)提出了克里格法(Kriging)的基本思想, 考虑了待估计点与已知点的位置关系及变量间的空间相关性, 属于线性最小二乘回归方法. Birkhoff和Garabedian(1960)将Schoenberg(1946)首次提出的样条(Spline)逼近法拓展为二维样条函数法. de Boor(1962)在二维网格成功发展了双三次样条函数法. Bengtsson和Nordbeck(1964)建立了用不规则分布点拟合有三角面形成曲面的不规则三角网(TIN)法. Zienkiewlcz(1967)提出了有限元方法(FEM), Akima(1978a, 1978b)完成了运用有限元拟合曲面的计算机编程. Shepard(1968)提出了空间相关性与其空间距离成反比的反距离加权法(IDW), 该方法的计算结果与所选取的权函数密切相关(Franke, 1982). Harder和Desmarais(1972)发现了基于无限板挠度方程的曲面样条插值方法. Maude(1973)通过将五次样条广义化到多个变量, 发展了基于矩形的混合方法. Talmi和Gilat(1977)基于样条方法, 构建了曲面的光滑逼近法. Foley和Nielson(1980)提出了可生成近似曲面的、基于伯恩斯坦多项式和双三次样条的迭代方法. 其他主要曲面建模方法包括趋势面分析(TSA)(Ahlberg等, 1967; Schroeder和Sjoquist, 1976; Legendre和Legendre, 1983)和生态环境要素逼近(Long, 1980).

自20世纪80年代以来, 曲面建模被广泛用于分析和认识地球表层过程的空间现象, 误差问题是其面临的主要挑战(杨志强, 2002; 魏克让和江聪世, 2003; 王光霞等, 2004; 汤国安等, 2005; 隋立芬等, 2010). 经典曲面建模方法的理论缺陷是其误差问题的主要根源(岳天祥等, 2017). 例如, 趋势面分析法是生成曲面的一种最简单方法, 它在空间坐标系中通过最小二乘回归将离散点拟合为一个趋势面, 因为模拟区域每一部分的变化和光滑处理都会影响整个曲面任何部分的拟合, 所以它丢失了模拟对象的真实细节信息(Oliver和Webster, 1990). 反距离加权法通过在采样点邻域内建立反距离加权函数, 模拟采样点邻域, 忽视了空间结构信息和邻域以外的信息联系(Zhao等, 2005; Magnussen等, 2007). 三角网模型是地理信息系统使用最广泛的曲面建模方法, 它通过对每三个采样点建立线性函数来模拟此三个采样点的所在区域, 丢弃了非线性信息和空间结构信息, 不能描绘悬崖和洞穴等曲面现象(Tse和Gold, 2004; Schneider, 2001). 克里格法是一种广义的最小二乘回归方法, 它通过有效数据的加权平均来估计模拟对象, 它的目标是估计的平均误差为

零、误差的方差达到最小. 由于估计的误差和误差的方差总是未知的, 所以克里格法的理想目标在实践中很难达到. 在实际应用中, 通过已知数据建立可以计算估计误差和误差方差的模型来确定计算采样点附近模拟点值的权重, 达到最佳(估计误差的方差达到最小)线性无偏(估计的平均误差为零)估计的目标, 它丢失了非线性信息, 同时引入了大量的人为主观因素(Isaaks和Srivastava, 1989). 样条基函数法将所有曲面近似的用一系列样条基函数进行连续的拼凑模拟, 只适用于很有限的一部分特殊曲面, 因此大多数情况下, 样条基函数法都会产生较大的模拟误差(Yue, 2011).

误差问题和多尺度模拟已成为地理信息系统的基本问题(Li, 2007; Zhu, 2005, 李志林和朱庆, 2000; 刘学军等, 2007; 吕一河和傅伯杰, 2001). 1983年美国国家航空和宇宙航行局召集领衔科学家讨论了地理信息系统的研究重点, 误差和多尺度问题被遴选为研究重点. 1994年为了支持地理信息科学研究和教学, 成立了美国地理信息科学大学联盟(the University Consortium for Geographical Information Science, UCGIS). 1996年, 误差和多尺度问题被确定为美国地理信息科学大学联盟(UCGIS)的十大研究重点中的两个重点. 2003年, 美国地理信息科学大学联盟将误差问题和多尺度问题确定为长期研究重点(Usery和McMaster, 2005).

1.2 生态环境曲面建模基本定理

一个曲面由外蕴量和内蕴量共同唯一决定(Somasundaram, 2005). 内蕴量是生态环境曲面微观细节信息的表达, 可通过地基观测和空间采样获取; 外蕴量是全局宏观信息的表达, 可通过卫星遥感和空间模型模拟获取(Yue, 2011). 许多学者已经意识到地表建模中内蕴量和外蕴量集成的紧迫性和必要性. 例如, Phillips(2002)研究表明, 地球表层系统由全局因素和局地因素控制, 如果不同时考虑局地和全局两类因素, 就无法全面认识地球表层系统. Chambers等(2007)和Emili等(2011)发现卫星遥感和地基观测提供了地表信息的两个不同方面, 地基观测可以提供观测点的高精度数据, 但它们仅局限于很稀疏的散布点位, 很难满足区域尺度有关问题的模拟分析需求; 卫星遥感可以提供地基观测无法获取的地表宏观格局信息, 但它无法描述地表微观过程. Ponsar等(2016)指出, 空间模型和地基观测提供了地表信息的不同片段, 它们任何一方都无法刻画地表的时空动态全貌. 如果想提高空间模型精度, 必须补充地基观测数据(Brill等, 1991).

基于上述质疑性讨论, 我们将系统论、优化控制论和曲面论引入了地球表层系统建模, 建立了可有效地合成内蕴量(微观过程信息)和外蕴量(宏观格局信息)的高精度曲面建模方法(HASM)(详见网络版附录1, http://earthcn.scichina.com), 解决了半个世纪以来困扰曲面建模的误差问题和多尺度问题(岳天祥等, 2017). 为了提升HASM运算速度, 我们建立了HASM适应法(HASM-AM)、多重网格法(HASM-MG)、修正的共轭梯度法(HASM-PCG)和平差算法(HASM-AC), 初步解决了曲面建模速度慢、内存需求大等问题. HASM-AM对误差较大的栅格进行细化后继续模拟, 而对满足精度要求的栅格不再处理, 以此达到减小计算量、提高运算速度的目的(Yue等, 2010a). 基于误差平滑和粗网格校正原理的HASM-MG是求解偏微分方程最快的数值方法(Yue等, 2013a). 共轭梯度法是一种求解大型线性系统的加速技术, HASM-PCG通过引入一个预条件器确保共轭梯度法以更快的速度收敛(Yue等, 2013b). HASM-AC通过将计算域划分为相互独立的规则小单元, 使求解方程在小单元进行, 以此提高运算速度, 为高性能计算奠定了理论基础(Yue和Wang, 2010).

HASM已成功应用于各种空间尺度地表要素曲面建模, 相比于经典曲面建模方法, 具有较高的精度. 例如, 数字地面模型构建(Yue等, 2010b; Chen和Yue, 2010; Chen等, 2012, 2013; Zhao等, 2015; Lv等, 2017)、航天飞机雷达地形测绘任务(SRTM)高程曲面空缺填补(Yue等, 2012)、二氧化碳浓度数据融合(Yue等, 2016b; Zhao M W等, 2017a, 2017b; Zhang等, 2017; Liu等, 2018)、碳卫星二氧化碳浓度曲面空缺填补(Yue等, 2015a)、气候变化分析(Yue等, 2013b, 2016c; Zhao N等, 2017a, 2017b, 2018a, 2018b, 2018c; Yue等, 2019)、人口空间分布动态模拟(Yue等, 2003, 2005a, 2005b)、土壤污染模拟分析(Shi等, 2016)、土壤属性空间模拟(Li等, 2013; 2017; Shi等, 2011)、生态系统空间分布变化模拟分析(Yue等, 2015c)、碳储量(Yue等, 2016a)和食物供给(Yue等, 2010c, 2008)等模拟分析. 通过对HASM理论发展和应用研究的提炼总结, 形成了地球表层系统建模基本定理及其关于空间插值、升尺度、降尺度、数据融合和模型-数据同化的推论(Yue等, 2015b, 2016d; 岳天祥等, 2017, 2020).

如果我们将地球表层系统及其环境要素从生态环境角度, 按自然、自然贡献和自然变化驱动力来划分, 并将自然曲面、自然贡献曲面和自然变化驱动力曲面统称为生态环境曲面, 则我们可得出以下生态环境曲面建模基本定理: 生态环境曲面由微观过程信息和宏观格局信息共同唯一决定, 在空间分辨率足够细的条件下, 高精度生态环境曲面可运用集成微观过程信息和宏观格局信息的恰当方法(如HASM)来构建. 此基本定理及其有关推论已被纳入联合国IPBES情景分析与建模方法的指导性文件(IPBES, 2016), 同时也出现在联合国IPBES全球评估报告中(IPBES, 2019).

本文以京津冀地区为案例区(图1), 系统地诠释了宏观格局信息和微观过程信息的信息完备性以及信息处理方法的理论完备性在生态环境曲面建模基本定理及其推论中的核心作用.

2 空间升尺度

在许多情况下, 为了节约计算成本, 需要将细分辨率数据转换为粗分辨率数据, 此过程称之为升尺度(Misaghian等, 2018). 许多学者发现, 通过简单空间平均得出的升尺度结果误差太大, 以至于无法接受(Crow等, 2012; Fry等, 2017). 因此, 我们运用HASM构建一种升尺度算法, 简记为HASM-US(详见网络版附录2).

我们运用HASM-US算法将京津冀地区空间分辨率为90m×90m的海拔高度曲面升尺度为空间分辨率为1km×1km的海拔高度曲面. 其外蕴量/遥感数据来自航天飞机雷达地形任务(SRTM)(http://srtm.csi.cgiar.org/), 内蕴量/地面观测数据来自基于千寻CORS系统的实时动态差分法(RTK)实测(图2).

我们将运用千寻CORS系统获得的560个地面观测点数据划分为10个数据集, 随机选取其中9个数据集用于HASM-US升尺度的优化控制条件, 其余一个数据集用于交叉验证. 通过与传统的双线性重采样和邻近点重采样升尺度算法比较, 分析HASM-US升尺度算法的最大正绝对误差、最大负绝对误差和均方根误差.

交叉验证结果表明(表1), 升尺度算法HASM-US的平均最大正绝对误差、最大负绝对误差和均方根误差分别为59、−70和19m, 双线性重采样分别为72、−107和28m, 临近点重采样为77、−113和28m. HASM-US、双线性重采样和邻近点重采样误差的最

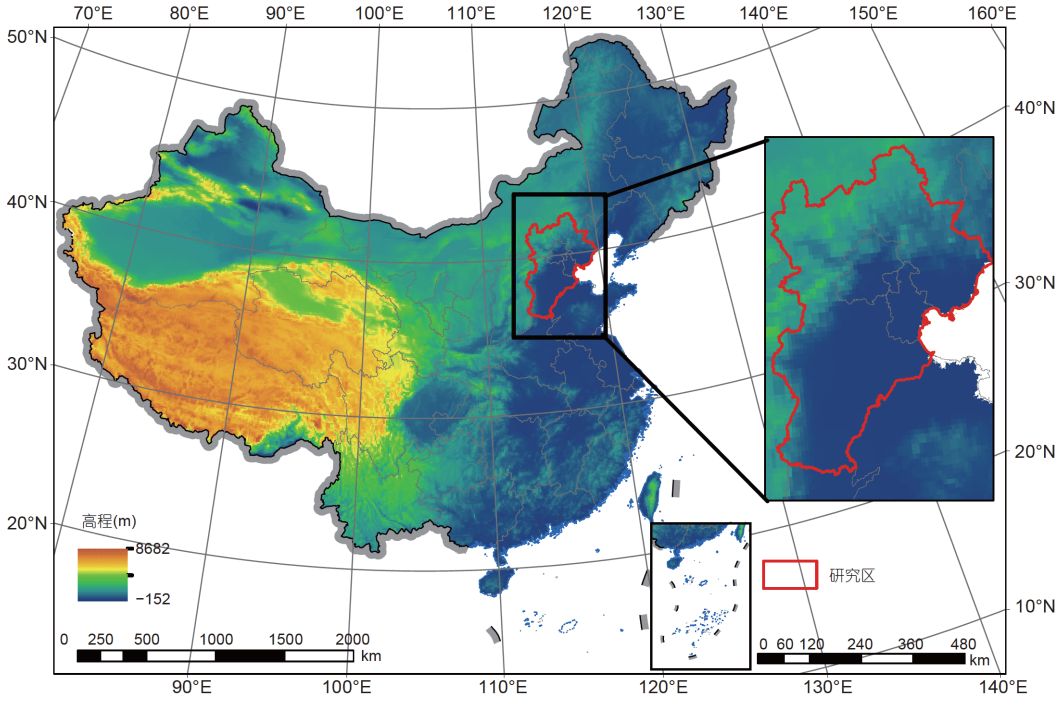


图 1 京津冀研究区位置图

大振幅分别为129、179和190m. 也就是说, HASM-US升尺度算法精度最高、运算结果最稳定.

根据HASM-US的升尺度结果, 京津冀地区海拔高度最大值为2824m. 以1000m海拔高度线为界, 可将京津冀地区划分为低于1000m的低海拔区和高于1000m的中海拔区. 京津冀以低海拔区为主, 面积为166698km^2, 占京津冀总面积的77.46%. 中海拔区48510km^2, 占总面积的22.54%. 低海拔区可分为六级, 中海拔区分为五级(表2; 图3). 在低海拔区, 大部分地区属于低于50m的1级区, 占低海拔区面积的48.39%; 在中海拔区, 介于1200m和1500m的8级区面积最大, 占中海拔区面积的51.48%.

我们将一个栅格的起伏度定义为其最大海拔高度与最小海拔高度之差. 根据《中华人民共和国地貌图集》的分级标准(Cheng等, 2011), 京津冀地区的地形起伏度划分为六级(表3). 京津冀地区的地形起伏度介于0~1592m. 起伏度小于30m的平坦地占京津冀总面积的40.28%, 集中分布在低海拔平原区, 其次分布在坝上高原区的冀蒙交界处, 其余平坦地零星散落在冀西北山间盆地一带. 台状起伏地主要分布于坝上高原边缘、华北平原及其向太行山和燕山的过渡区及冀西北的山间盆地区, 占京津冀总面积的6.75%. 丘状地主要分布在河北平原的边缘地带、山间盆地和河谷地带及大马群山向西北的山前地带, 占京津冀总面积的11.44%. 低起伏与中起伏区在空间上较为聚集, 主要分布于太行山和燕山山地, 占总面积的41.26%. 高起伏区面积最少, 主要分布在太行山的小台五山、东猴顶和雾灵山, 占区域总面积的0.27%(图4).

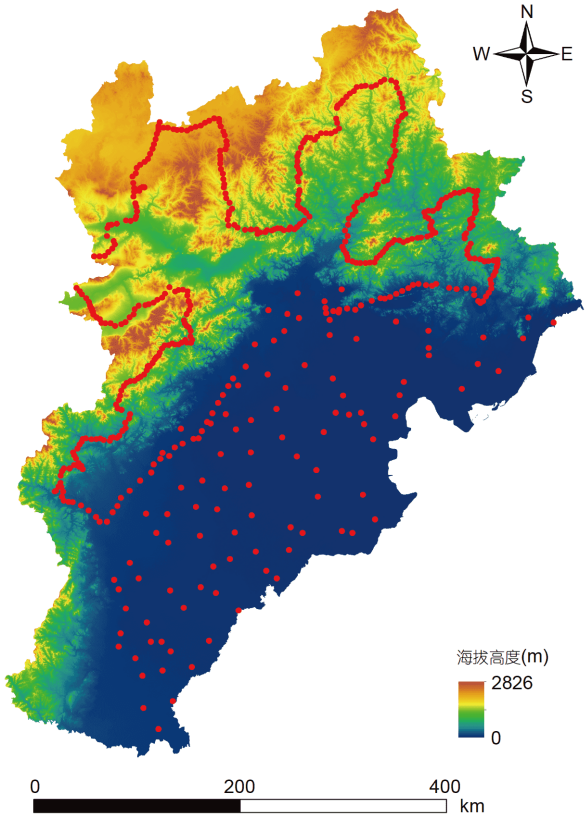


图 2　基于千寻CORS全球定位系统的空间采样点分布

红点代表采样点

表 1　HASM-US、双线性重采样和邻近点重采样[a)]

用于交叉验证的数据集编号	HASM-US(m)			双线性重采样(m)			邻近点重采样(m)		
	MPAE	MNAE	RMSE	MPAE	MNAE	RMSE	MPAE	MNAE	RMSE
1	71	−67	21	151	−159	40	159	−156	40
2	103	−65	19	14	−211	37	15	−231	39
3	70	−61	21	21	−147	25	25	−147	25
4	28	−54	14	16	−47	16	22	−61	19
5	81	−101	29	20	−78	18	27	−93	19
6	48	−76	17	24	−79	24	29	−86	24
7	37	−101	19	30	−64	21	30	−68	22
8	41	−53	15	146	−131	32	154	−135	34
9	8	−59	16	151	−56	26	159	−56	27
10	101	−64	24	144	−95	35	152	−99	36
平均误差	59	−70	19	72	−107	28	77	−113	28

a) MPAE、MNAE和RMSE分别代表最大正绝对误差、最大负绝对误差和均方根误差

表 2　京津冀地区海拔分级

低海拔区				中海拔区			
分级	海拔范围(m)	面积(km^2)	比例(%)	分级	海拔范围(m)	面积(km^2)	比例(%)
1	<50	80660	37.48	7	1000~1200	13490	6.27
2	50~100	14325	6.66	8	1200~1500	24972	11.60
3	100~200	9544	4.43	9	1500~2000	9764	4.54
4	200~500	21737	10.10	10	2000~2500	267	0.12
5	500~800	24804	11.53	11	>2500	17	0.01
6	800~1000	15628	7.26				
小计		166698	77.46	小计		48510	22.54

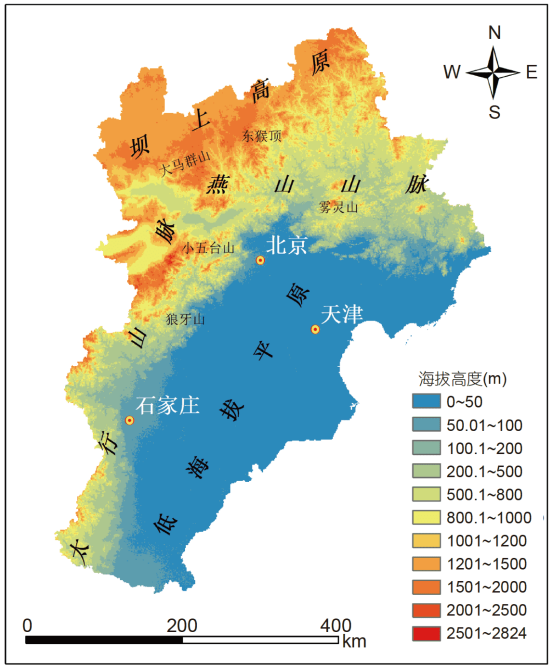


图 3　基于HASM-US升尺度的京津冀地区海拔高度曲面

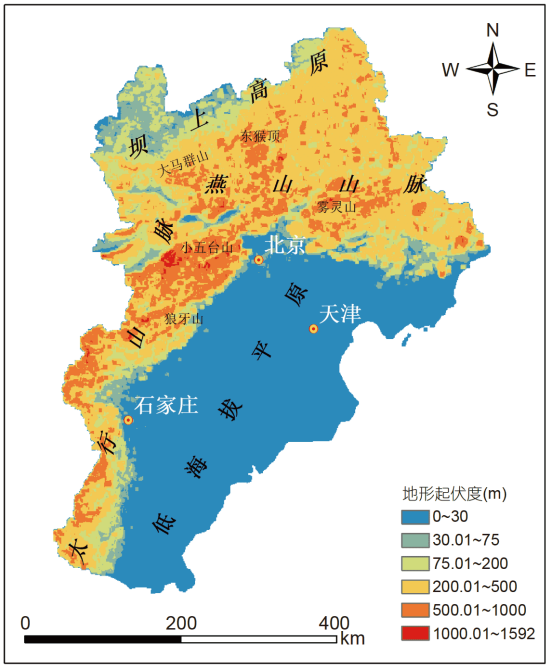


图 4　基于HASM-US升尺度的京津冀地区起伏度曲面

表 3　京津冀地区地形起伏度分级

分级		标准(m)	面积(km^2)	比例(%)
1	平坦地	<30	86692	40.28
2	台状起伏	30~75	14526	6.75
3	丘状起伏	75~200	24622	11.44
4	低起伏	200~500	65218	30.30
5	中起伏	500~1000	23578	10.96
6	高起伏	>1000	572	0.27
合计			215208	100

3　空间降尺度

许多模型和数据由于空间分辨率太粗而无法用于分析区域尺度和局地尺度问题. 为了解决这个问题, 需要将粗分辨模型输出结果和粗分辨率数据转换为高空间分辨率数据, 这个转换过程被称为降尺度, 简记为HASM-DS. 本节运用HASM-DS空间降尺度算法(详见网络版附录3)将空间分辨率为1°×1°的CMIP5年平均气温情景数据降尺度到1km×1km空间分辨率, 实证外蕴量和内蕴量集成对提高降尺度精度的关键作用.

CMIP5数据集由21个全球气候模式模拟结果的简

单平均生成, 包括历史气候模拟及RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5未来情景, 数据的时间段分为1976~2005年(T0)、2011~2040年(T1)、2041~2070年(T2)和2071~2100年(T3). HASM-DS的优化控制条件为京津冀及其周边地区的328个气象台站观测数据(图5). 空间分辨率为1km×1km的海拔高度曲面为降尺度的辅助数据. 统计分析结果表明, 京津冀地区的年平均气温具有空间平稳特性.

空间分辨率为1°×1°的京津冀1976~2005年CMIP5年平均气温曲面被降尺度到1km×1km空间分辨率. 在此降尺度过程中, 以CMIP5数据为HASM-DS驱动场、以85%的气象台站观测数据为优化控制条件来运行HASM-DS降尺度算法, 15%的气象台站观测数据用于交叉验证.

交叉验证结果表明, HASM-DS降尺度算法较传统的普通最小二乘回归降尺度具有很高精度(表4). 原始CMIP5数据、普通最小二乘回归降尺度和HASM-DS降尺度结果的平均绝对误差分别为1.86、1.62和0.51℃. 它们的平均相对误差分别为24%、23%和7%, 相关系数分别为0.66、0.80和0.96, HASM-DS降尺度的置信度为95%. 也就是说, 通过HASM-DS降尺度, 可使原始CMIP5数据的平均绝对误差至少降低了17%.

CMIP5、普通最小二乘回归降尺度和HASM-DS降尺度结果的年平均气温空间格局大致类似, 存在着明显的纬度地带规律. 然而, 由于HASM-DS综合考虑了外蕴量和内蕴量, 其空间格局包含了更多的细节信息(图6). 根据HASM-DS降尺度结果, 京津冀地区年平均气温从南到北逐渐降低; 最低年平均气温2.15℃, 出现在北部山区; 最高年平均气温为14.38℃, 出现在京津冀南部; 京津冀全区年平均气温的平均值为9.85℃.

在RCP2.6情景下, 根据HASM-DS降尺度结果, T1~T2时期, 京津冀年平均温度将平均增加0.51℃(图7a), 年平均气温增加幅度由北向南逐级增加; 最大增温幅度为0.54℃, 将出现在(38°N, 117°E), 最低增温幅度为0.45℃出现在42°N~43°N和 117°E~118°E区域. 从T2~T3时期, 京津冀年平均气温将降低0.09℃, 气温降低幅度由北到南逐级减小; 最大降幅为−0.13℃, 将出现在42°N~43°N和117°E~118°E区间; 最小降幅为0.07℃, 将出现在37°N~38°N和117°E~118°E区间.

在RCP4.5情景下(图7b), T1~T2时期, 年平均气温将平均升高0.90℃, 最大升温将是0.94℃, 将出现在

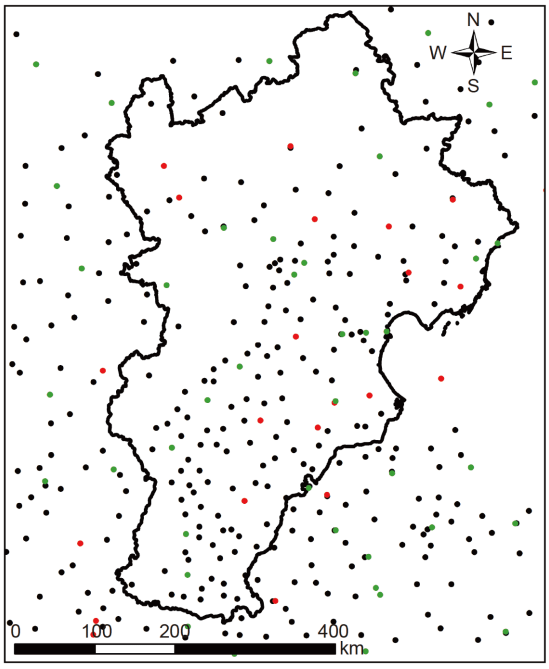


图 5　京津冀及其周边地区气象台站空间分布

黑色、绿色和红色气象台站, 共328个, 其中绿色台站(49个)在第4节被用于数据融合、红色台站(45个)在第6节被用于数据同化

表 4　降尺度结果与原始数据精度比较

方法	CMIP5	普通最小二乘回归降尺度	HASM-DS
平均绝对误差(℃)	1.86	1.62	0.51
平均相对误差(%)	24	23	7
相关系数	0.66	0.80	0.96

36°N~37°N和113°E~114°E区域; 最小升温将为0.88℃, 将出现在39°N和115°E~116°E区域. 从T2~T3时期, 最大升温幅度、最小升温幅度和平均升温分别为0.51、0.43和0.49℃, 最大升温和最小升温将分别出现在40°N~41°N和116°E~117°E区域及36°N~37°N和113°E~114°E区域.

在RCP8.5情景下(图7c), T1~T2时期, 年平均升温1.66℃, 升温幅度从南到北将逐渐增加; 最大升温幅度为1.69℃, 将发生在42°N~43°N和118°E区间; 最小升温为1.59℃, 将发生在36°N~37°N和113°E~114°E区间. 在T2~T3时期, 平均升温1.89℃, 升温幅度由南到北逐渐增加; 最大升温将为1.99℃, 发生在42°N~43°N和117°E~118°E区间; 最小升温幅度为1.80℃, 将发生在

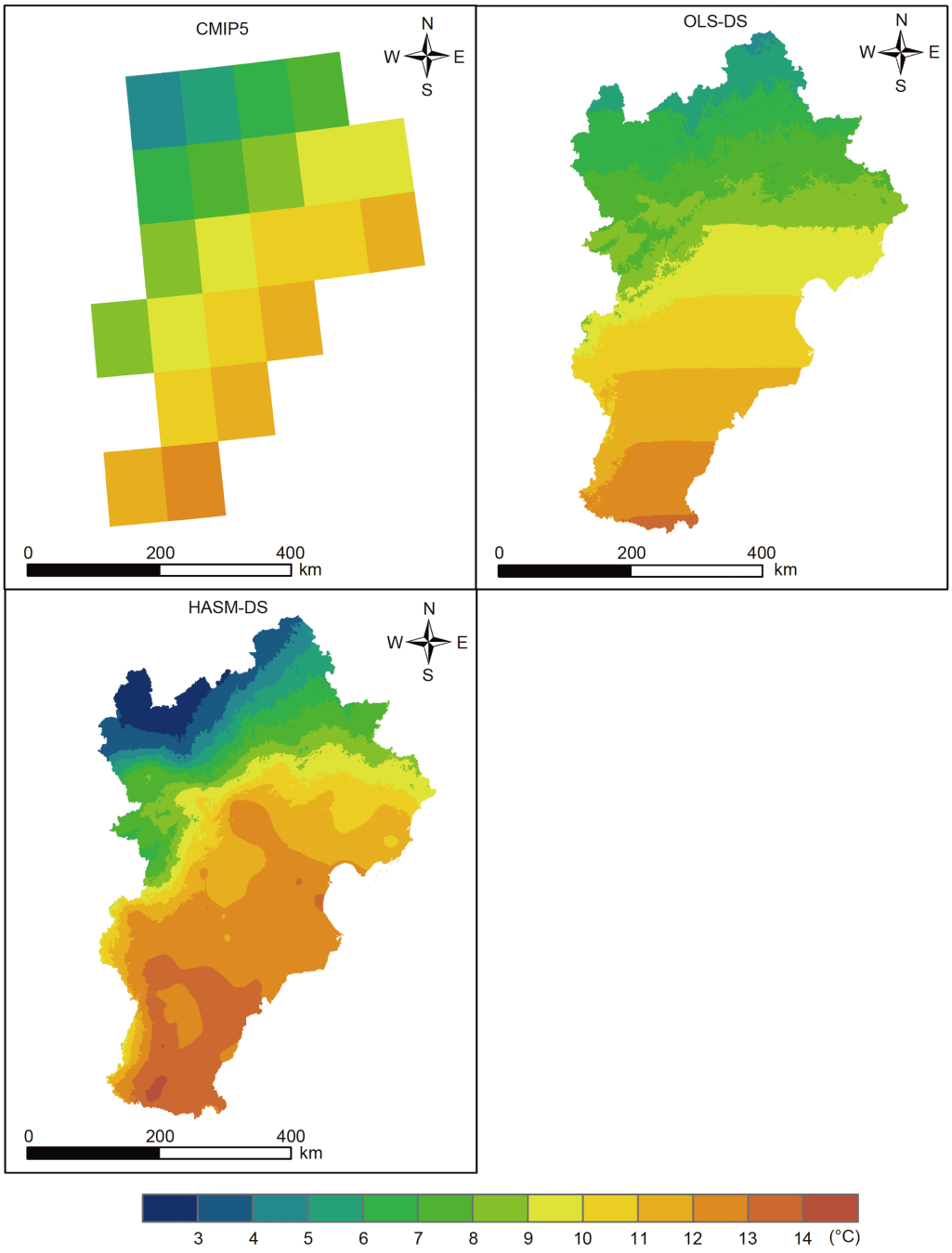


图 6　京津冀地区CMIP5、普通最小二乘回归降尺度和HASM-DS降尺度结果的年平均气温空间格局

36°N~37°N和114°E~115°E区间.

4　数据融合

数据融合是将表达同一现实对象的多源、多尺度数据和知识集成到一个一致的有用形式，其主要目的是提高信息的质量，使融合结果比单独使用任何一个数据源都有更高精度(Mitchell，2012)．本文将数据融合算法简记为HASM-DF．从京津冀及其周边地区的328个气象台站中，选出满足WRF区域气候模式数据

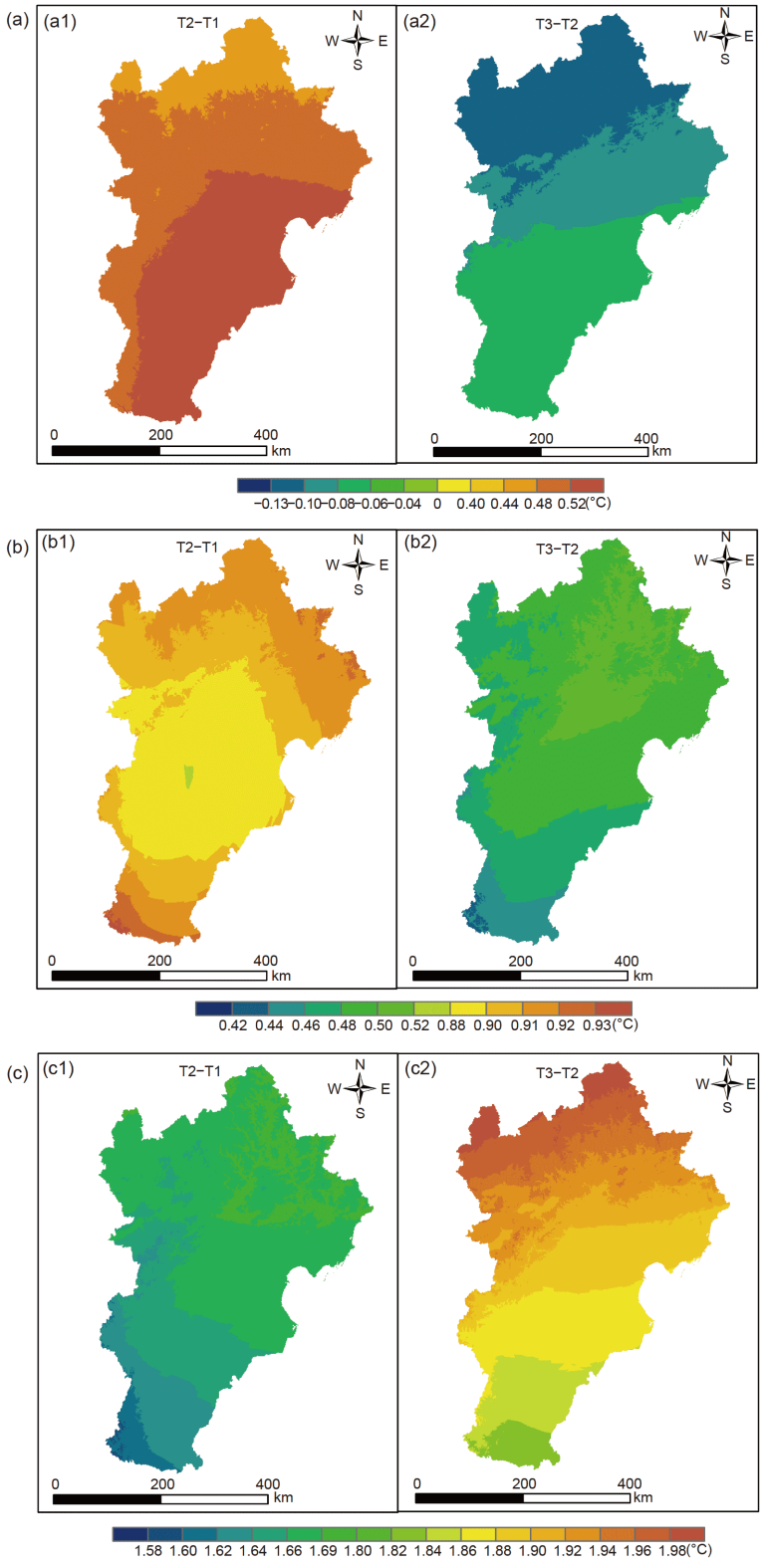


图 7　RCP2.6(a)、RCP4.5(b)和RCP8.5(c)情景下京津冀年平均气温变化

(a1)、(b1)和(c1)为T2时期年平均气温减去T1时期年平均气温; (a2)、(b2)和(c2)为T3时期年平均气温减去T2时期年平均气温

要求的49气象台站(图5中的绿色台站). 这49个气象台站可提供1955~2014年期间的日平均气温数据. 京津冀地区HASM-DF数据融合的月平均气温曲面是WRF区域模式的模拟结果与其残差曲面之和, 其中残差曲面是49个气象台站处观测值与WRF模拟结果之差的HASM-SI空间插值(详见网络版附录4).

在交叉验证过程中, 每次随机取一个气象台站进行误差计算, 其余48个气象台站用于数据融合的优化控制条件, 直到49个气象台站全部参与了误差计算为止. 交叉验证结果显示, WRF区域气候模式的模拟结果与气象台站观测数据相比偏冷, 尤其在秋季, 模拟结果比观测值低−1.14℃, 年平均误差为−0.8℃(如表5). HASM-DF数据融合结果的误差在−0.17~0.16℃变动, 年平均误差为−0.02℃. 通过数据融合, 使平均绝对误差由WRF区域模式的1.02℃降低到HASM-DF的0.45℃. 也就是说, 由于HASM-DF数据融合, 使年平均气温的平均绝对误差降低了70%.

根据HASM-DF数据融合结果, 在1955~2014年期间, 年平均气温与海拔高度呈负相关关系. 也就是说, 海拔越高, 年平均气温越低. 坝上高原、燕山山区和太行山区的年平均气温低于9℃. 最低年平均气温为−2.6℃, 出现在小五台山顶部(115.0°E, 39.9°N), 其海拔高度在2500m以上. 在38°N以南地区, 年平均气温高于13℃. 另外, 由于城市热岛效应, 北京和天津市区的年平均气温也高于13℃(图8).

为了叙述方便, 我们将1955~1964年、1965~1974年、1975~1984年、1985~1994年、1995~2004年和2005~2014年等10年期分别标记为p1、p2、p3、p4、p5和p6. p1~p2时期, 京津冀地区以降温为主, 东部和中部的大部分区域降温超过−0.2℃; 但南部和西北部存在弱的升温. p2~p3时期, 京津冀地区整体升温, 升温幅度在0.2~0.6℃, 其中大部分地区升温超过了0.4℃. p3~p4时期, 升温幅度在0~0.4℃. p4~p5时期, 升温幅度由东向西逐渐升高; 特别在西部和西北部及北京市区, 最高升温幅度超过了0.8℃. p5~p6时期, 气温变化幅度在−0.2~0.2℃, 升温和降温区域占比相当; 北部和东部沿海存在超过−0.4℃的降温(图9).

我们将每年12个月划分为3~5月的春季、6~8月的夏季、9~11月的秋季和12~2月的冬季. 根据Mann-Kendall趋势分析算法(Mann, 1945; Hamed, 2009), 所有季节的平均温度都呈上升趋势(表6), 其置信度为99%; 然而, 各个季节的增温速率差异很大.

HASM-DF数据融合结果表明, 京津冀地区春季的增温速率为0.040℃ a^{-1}; 春季的最低平均气温为8.3℃, 出现在1956年; 最高平均气温为13.0℃, 发生在2014年. 夏季的增温速率为0.019℃ a^{-1}, 在四个季节中最小; 夏季的最低和最高平均温度分别为20.9和24.2℃, 出现在1976年和2000年. 秋季增温速率为0.025℃ a^{-1}, 略高于夏季; 平均最低温度为8.1℃, 平均最高温度为11.7℃, 它们分别发生于1981年和2006年. 冬季增温速率为0.039℃ a^{-1}, 最低冬季平均温度和最高冬季平均温度分别出现在1969年和2007年, 为−8.5℃和−2.6℃. 也就是说, 春季和冬季增温速率较快, 各个季节的平均最高温度都出现在2000年以后. 京津冀地区在1955~2014年期间的年平均增温速率为0.030℃ a^{-1}, 远高于全球0.012℃ a^{-1}的年平均增温速率.

在春季的p1~p2时段, 京津冀地区北部存在着分散的小范围降温区域, 幅度在−0.2~0℃. 随纬度的降低, 气温变化趋势逐渐变为升温, 38°N以南的升温幅度达到0.4℃以上. p2~p3时段, 整个研究区以升温为主, 特别在东北部, 升温达0.6℃以上. p3~p4时段, 中部和北部升温趋势减弱, 39°N以南地区转为降温. 研究时段内, 最大升温发生在p4~p5时段, 春季大部分地区升温超过0.6℃, 特别是117°E以西地区, 存在大片的1℃以上的剧烈升温. p5~p6时段, 呈现北部降温南部升温的特点, 北部和东部有小范围的超过−0.4℃的降温, 而南

表 5　气温的季平均误差和年平均误差及比较

	方法	春季(℃)	夏季(℃)	秋季(℃)	冬季(℃)	年平均(℃)
平均误差	WRF	−0.86	−0.22	−1.14	−0.98	−0.80
	HASM-DF	0.16	0.05	−0.12	−0.17	−0.02
平均绝对误差	WRF	1.48	0.70	1.15	1.16	1.02
	HASM-DF	0.63	0.42	0.44	0.62	0.45

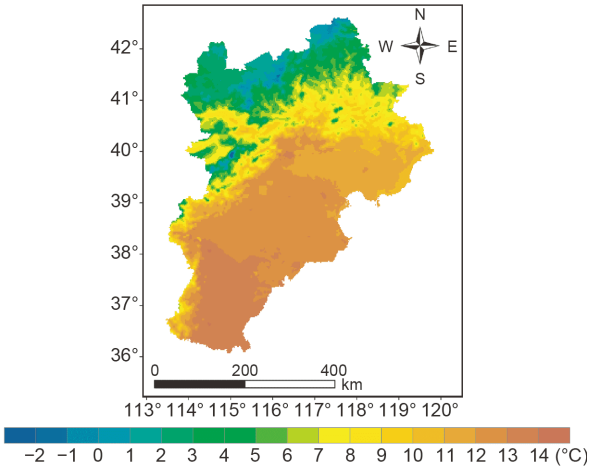


图 8　京津冀地区1955~2014年期间年平均气温的空间格局

端的升温幅度最高超过了0.4℃(图10).

在夏季的p1~p2时段, 除研究区西北部和南部存在很小范围的升温外, 其他大部分地区维持较大幅度的降温, 超过−0.4℃降温的区域从东部延伸至中部等地. p2~p3时段, 夏季气温变化随纬度呈现北高南低的特点, 变化幅度在−0.4~0.4℃; 东北侧也存在−0.2℃以内的弱降温. p3~p4段升温区域覆盖了大部分研究区, 西北部、南部和北京的部分地区有超过0.2℃以上的升温. p4~p5时段, 出现了最大幅度的升温, 升温幅度小于春季, 在西北部、北部、东部和北京等地出现了小范围的0.6℃以上的升温区域. p5~p6时段, 大部分区域升温在0.2~0.4℃, 并存在零散的0.4℃以上的升温区域(图11).

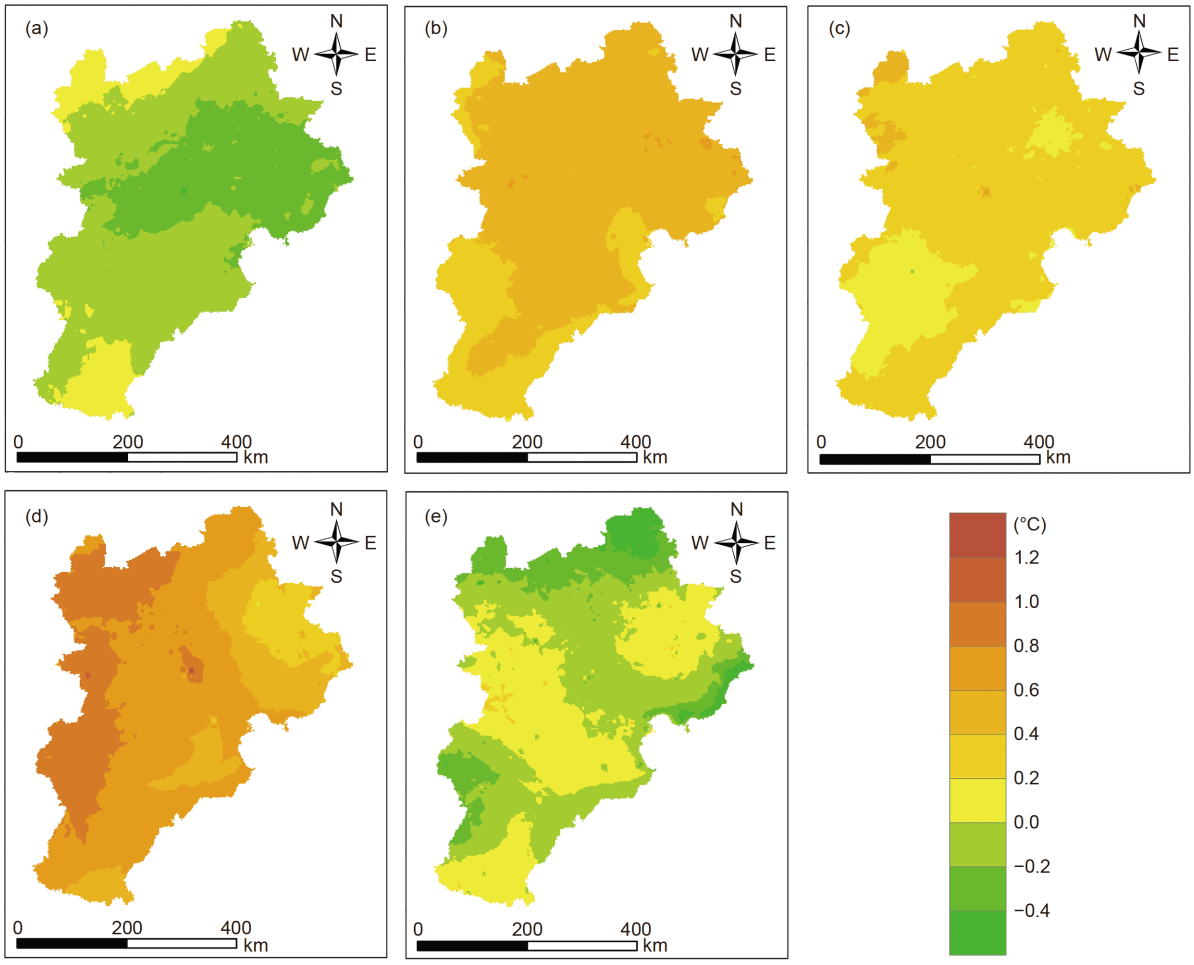


图 9　京津冀地区10年期的年平均温度变化

(a) p2时期年平均气温减去p1时期年平均气温; (b) p3时期年平均气温减去p2时期年平均气温; (c) p4时期年平均气温减去p3时期年平均气温; (d) p5时期年平均气温减去p4时期年平均气温; (e) p6时期年平均气温减去p5时期年平均气温

表 6　1955~2014年期间京津冀地区的年平均温度和季平均温度Mann-Kendall趋势分析[a)]

时间	趋势	增温速率 (℃ a^{-1})	置信度	相关系数
春季	↑	0.040	99%	0.61
夏季	↑	0.019	99%	0.46
秋季	↑	0.025	99%	0.53
冬季	↑	0.039	99%	0.51
全年	↑	0.030	99%	0.71

a) “↑”表示上升趋势

秋季的p1~p2时段，大部分区域的变温幅度在−0.2~0.2℃，其中降温主要集中在116°E~118.5°E和38°N~41°N．p2~p3时段，整个研究区以0.2~0.6℃升温为主，除北部山区较为分散的0.4~0.6℃升温区外，在37.5°N~39.5°N和115°E~118°E，也存在大范围的0.4~0.6℃升温．p3~p4升温幅度略微减弱，中部和西南侧有小范围的−0.2~0℃的弱降温区域．p4~p5时段，除了东北部小范围降温区，大部分地区以升温为主，特别是115°E以西地区以及北京和天津城区，升温超过0.4℃．p5~T6时段，依然保持着较高的升温幅度，38°N以北和37°N以南大部分地区，维持着超过0.4℃的升温幅度(图12)．

冬季的p1~p2时段，除了北侧边界附近有小范围的升温外，其他区域的气温均有下降的趋势，特别是超过−0.4℃的降温主导了大部分地区．p2~p3时段，升温较大，甚至在西部和南部出现了小范围的1.2℃以上的强

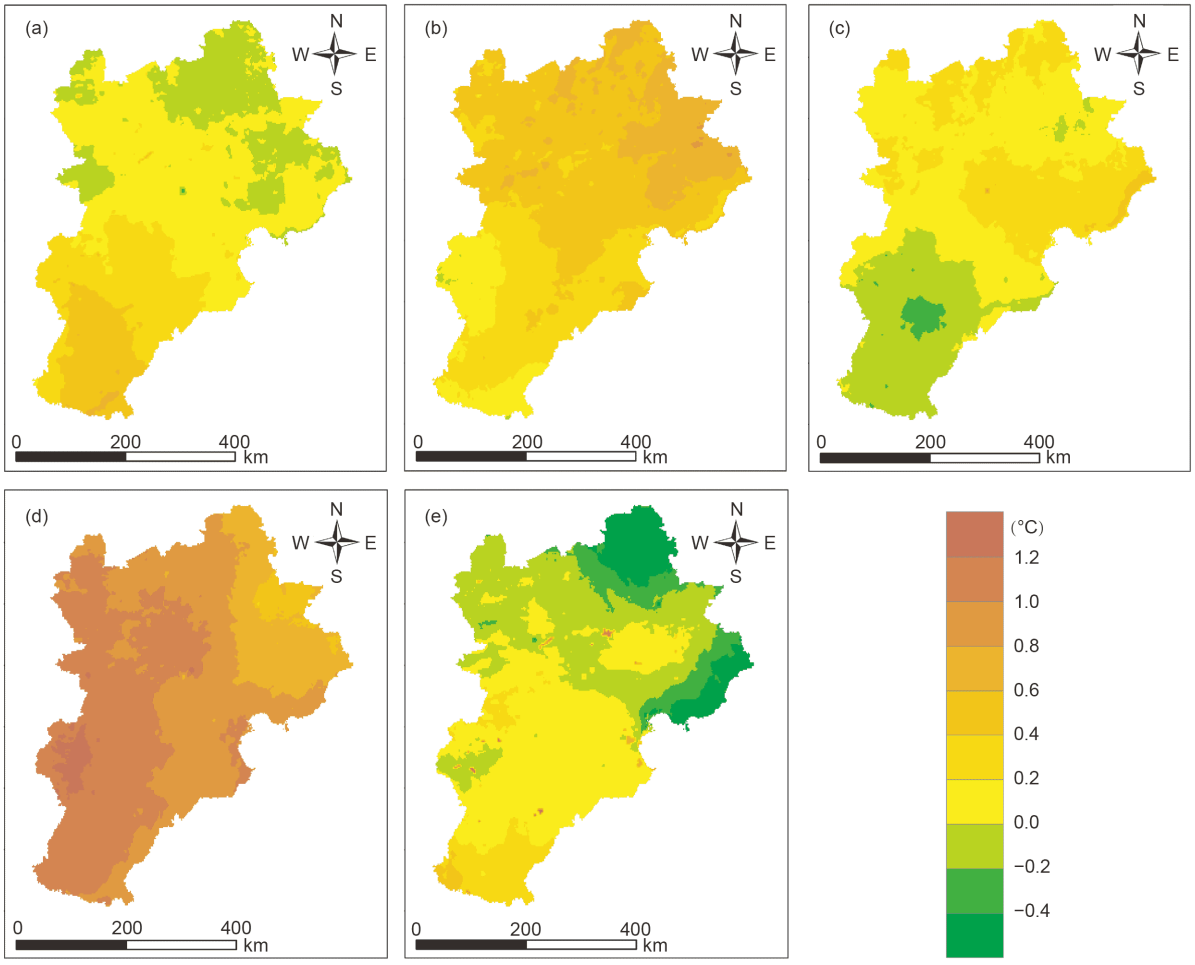


图 10　京津冀地区10年期的春季平均温度变化

(a) p2时期春季平均气温减去p1时期春季平均气温; (b) p3时期春季平均气温减去p2时期春季平均气温; (c) p4时期春季平均气温减去p3时期春季平均气温; (d) p5时期春季平均气温减去p4时期春季平均气温; (e) p6时期春季平均气温减去p5时期春季平均气温

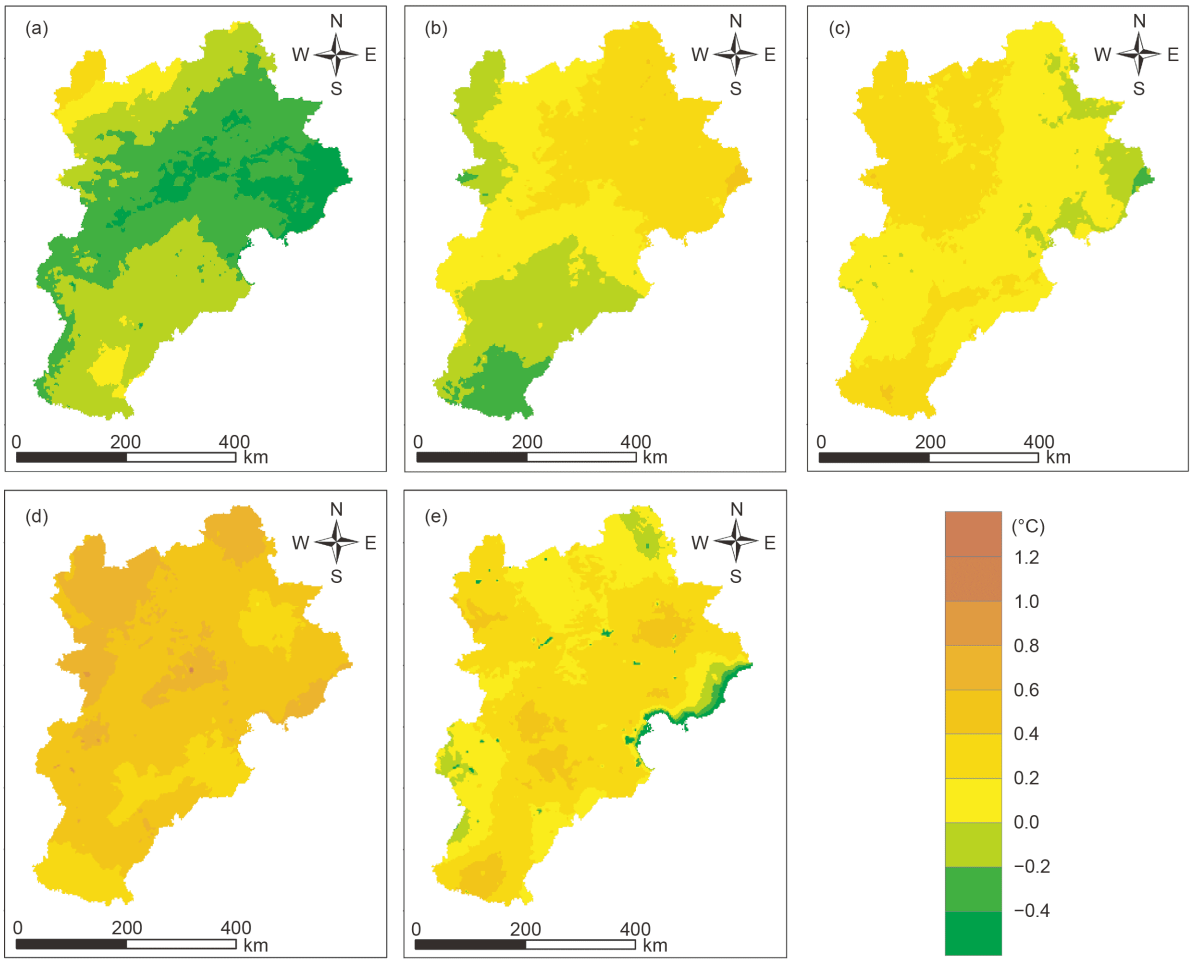


图 11　京津冀地区10年期的夏季平均温度变化

(a) p2时期夏季平均气温减去p1时期夏季平均气温; (b) p3时期夏季平均气温减去p2时期夏季平均气温; (c) p4时期夏季平均气温减去p3时期夏季平均气温; (d) p5时期夏季平均气温减去p4时期夏季平均气温, (e) p6时期夏季平均气温减去p5时期夏季平均气温

烈升温区域. p3~p4时段, 冬季升温幅度略微减弱, 但大部分地区依然维持在0.6℃以上的升温, 西北部和东部以及北京和天津市区的升温超过了0.8℃. p4~p5时段, 与其他三个季节变化特征相似, 均是西高东低的升温趋势; 西部和西北部以及北京市区的部分地区达到了1.2℃以上升温. p5~p6时段, 冬季的气温变化趋势与之前的时段完全相反, 整个地区降温, 且绝大部分地区降温幅度超过了−0.4℃(图13).

5　空间插值

空间插值就是利用离散点信息或不连续的面状信息构建一个连续的曲面(Li和Heap, 2014). 它的目的是使用有限的观测值或有信息空缺的曲面, 运用有效方法对无数据的点进行填补(Wang和Wang, 2012; Yue等, 2015b). 基于高精度曲面建模(HASM)方法的空间插值法(简记为HASM-SI)是一种有限差分方法(详见网络版附录5); 诸如反距离插值(IDW)、克里格(Kriging)、不规则三角网(TIN)和样条函数法(Spline)等经典方法都可归结为局域加权法.

在京津冀及其周边地区的328气象台站中(图5中的黑色、绿色和红色气象台站), 随机选取85%的气象台站用于空间插值, 其余15%用于交叉检验. 空间统计分析结果表明, 京津冀地区年平均降水量空间非平稳. 因此, 我们以数字地面模型(图3)为辅助变量, 通过所选气象台站观测降水数据建立地理加权回归方程, 并

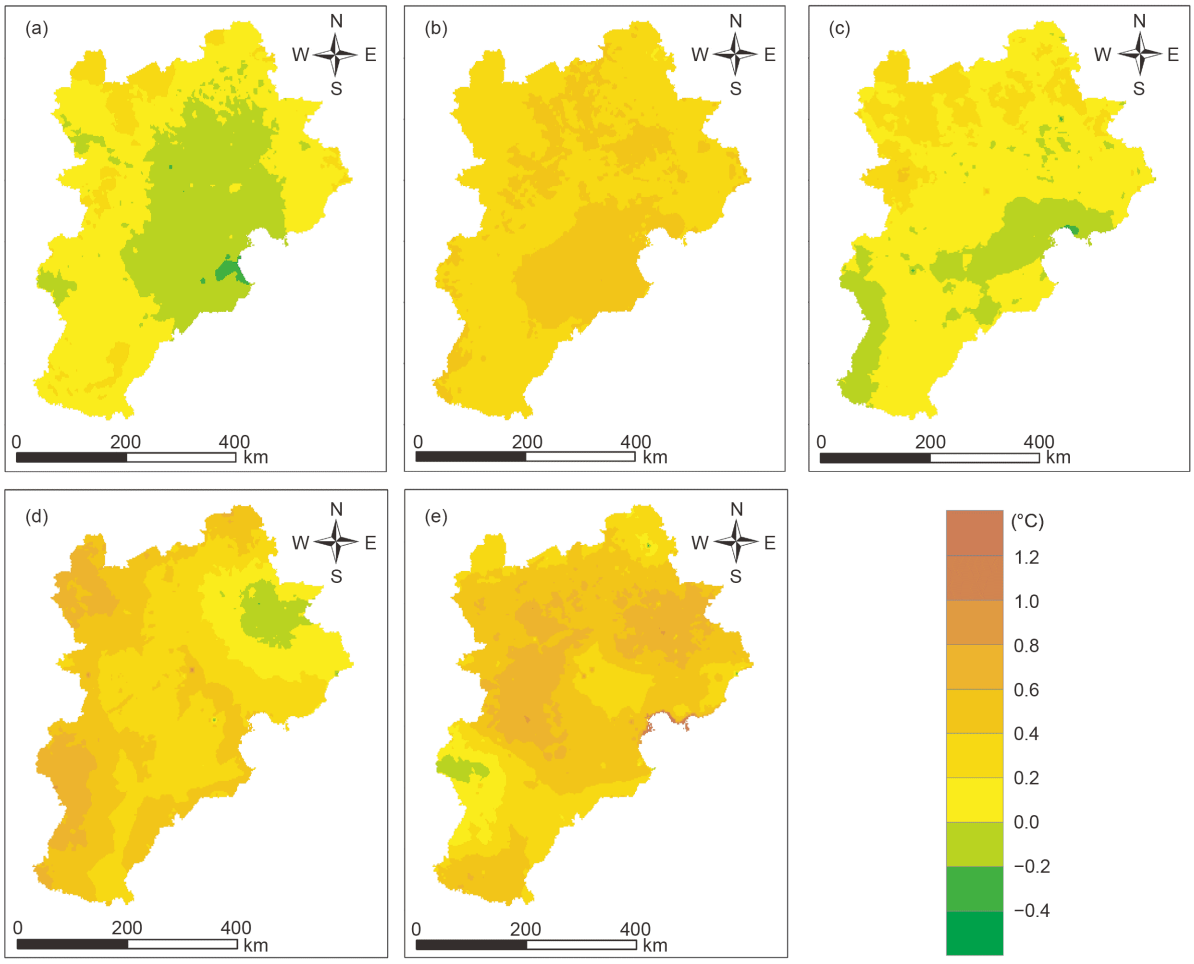


图 12　京津冀地区10年期的秋季平均温度变化

(a) p2时期秋季平均气温减去p1时期秋季平均气温; (b) p3时期秋季平均气温减去p2时期秋季平均气温; (c) p4时期秋季平均气温减去p3时期秋季平均气温; (d) p5时期秋季平均气温减去p4时期秋季平均气温; (e) p6时期秋季平均气温减去p5时期秋季平均气温

将这个地理加权回归方程在所选气象台站处与观测值的残差运用HASM插值到每个栅格. 每个栅格处地理加权回归方程值与其残差之和即为HASM-SI年平均降水量. 验证结果表明, HASM-SI空间插值方法较反距离加权、普通克里格和样条函数法有较高精度(图14; 表7). 反距离加权、普通克里格、样条函数法和HASM-SI平均相对误差分别为4.2%、3.7%、4.0%和3.5%, 它们在95%置信度的相关系数分别为0.928、0.941、0.913和0.943.

京津冀地区降水的空间分布受燕山、太行山山脉影响较大, 燕山以南、太行山以东地区降水多于燕山以北及太行山以西地区. 受海洋气候的影响, 整体上呈现为燕山以南的东部临海地区降水偏多, 其范围在39°N~41°N, 115°E~120°E. 降水最大值出现在40°N~41°N, 118°E~119°E, 最大降水量为711mm. 燕山以北地区降水量介于186~450mm, 最小降水量为186mm, 出现在接近于(40°N, 115°E)附近. 39°N以南地区降水呈现中间降水偏少, 东部及西部降水偏多的分布特点, 这是由于太行山及渤海海等地理地形的影响, 降水量介于450~550mm. 也就是说, 京津冀地区降水整体上除了具有纬度地带性外, 受地形调节作用显著.

我们将1976~1985年、1986~1995年、1996~2005年和2006~2015年分别标记为t1、t2、t3和t4. HASM-SI插值结果显示(图15), t1~t2时段, 该地区降水平均增加了12mm, 燕山山脉附近降水呈增多趋势, 降水增加最多的地方出现在(41°N, 118°E)附近, 最大增加量为

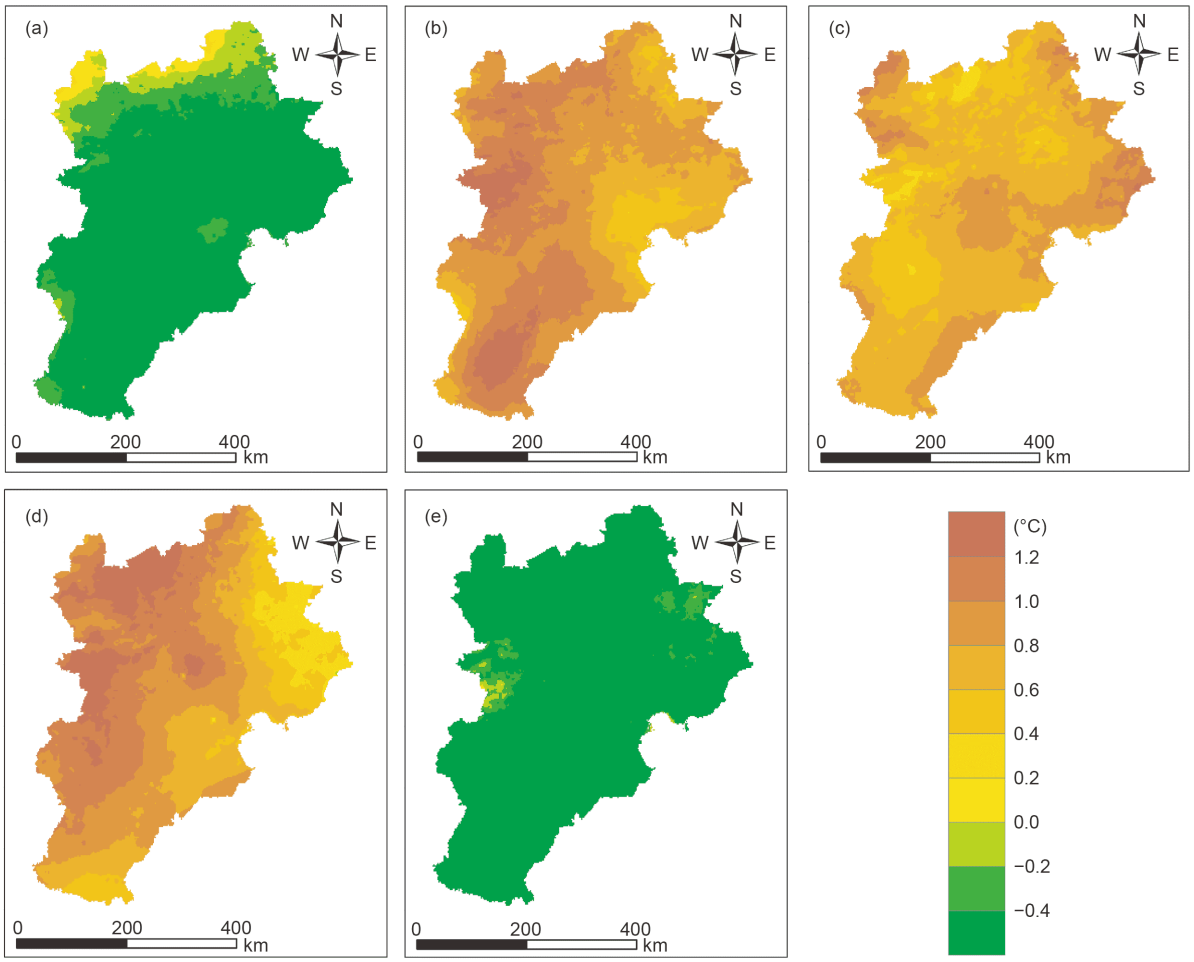


图 13　京津冀地区10年期的冬季平均温度变化

(a) p2时期冬季平均气温减去p1时期冬季平均气温; (b) p3时期冬季平均气温减去p2时期冬季平均气温; (c) p4时期冬季平均气温减去p3时期冬季平均气温; (d) p5时期冬季平均气温减去p4时期冬季平均气温; (e) p6时期冬季平均气温减去p5时期冬季平均气温

189mm. 山前及临海地区降水有减少趋势, 最大减少了101mm, 出现在西部38°N~39°N、113°E~114°E. t2~t3时段, 降水有减少趋势, 平均减少了58mm, 主要集中在山前及沿海地区, 最大减少量为167mm, 出现在38°N~39°N、116°E附近. 燕山以北及京津冀南部地区降水有所增加, 最大增加量为80mm, 出现在山前地区, 介于40°N~41°N、117°E~118°E. t3~t4时段, 除了燕山北部及京津冀南部地区外, 降水基本上呈现增加趋势, 降水平均增加30mm; 降水增加最多的地方出现在38°N~39°N、116°E~117°E, 最大增加量为159mm. 降水最大减少量为193mm, 出现在40°N~41°N、119°E~120°E.

在1976~2015年期间, 京津冀地区降水呈现减少趋势, 平均减小速率为−6mm (10a)$^{-1}$; 最大减少速率为−41mm (10a)$^{-1}$, 出现在40°N~41°N、117°E~118°E区域. 然而, 京津冀地区散布着许多平均降水量增加的区域, 最大增加幅度为28mm, 出现在37°N~38°N、117°E~ 118°E区域.

6　模型-数据同化

模型-数据同化就是将地面观测数据并入系统模型的过程, 其目的是根据地面观测数据调整系统模型的初始状态变量或参数来提高系统的模拟精度(Yue等, 2016a; Nichols, 2010). 系统模型和地面观测分别提供了丰富的地球表层系统信息片段, 但系统模型和地

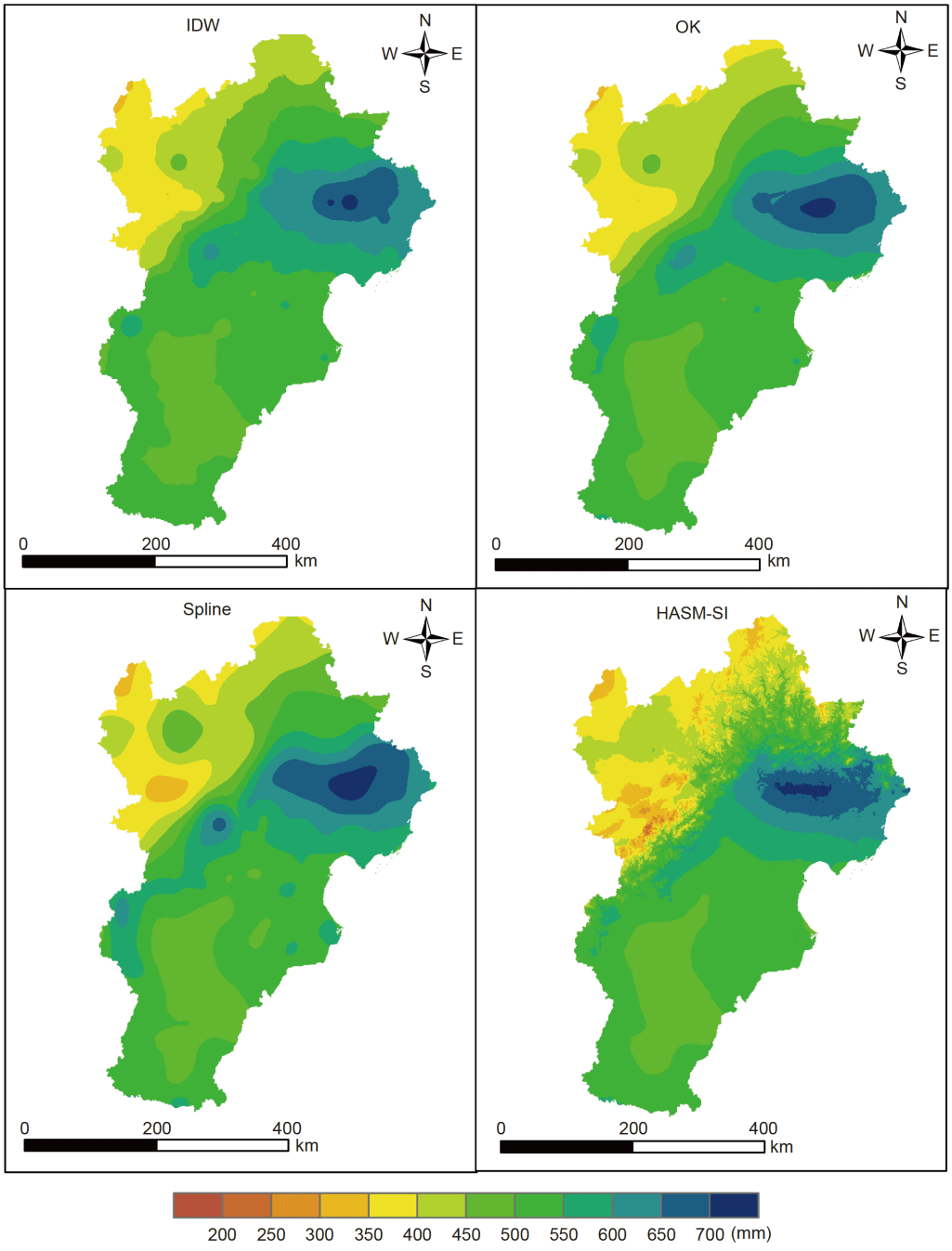


图 14　各种方法对年平均降水量气象台站的观测数据插值结果比较

表 7　插值方法误差比较

方法	IDW	OK	Spline	HASM-SI
平均绝对误差(mm)	22	19	20	18
平均相对误差(%)	4.2	3.7	4.0	3.5
相关系数	0.928	0.941	0.913	0.943

面观测都不能提供地球表层系统全貌(Ponsar等, 2016). 为了使系统模型的模拟结果尽可能精确, 必须补充现有的地面观测信息(Brill等, 1991). 模型-数据同化保持了动态模型的预测能力, 同时也可推断观测数据没有显现的定量信息(Li等, 2014).

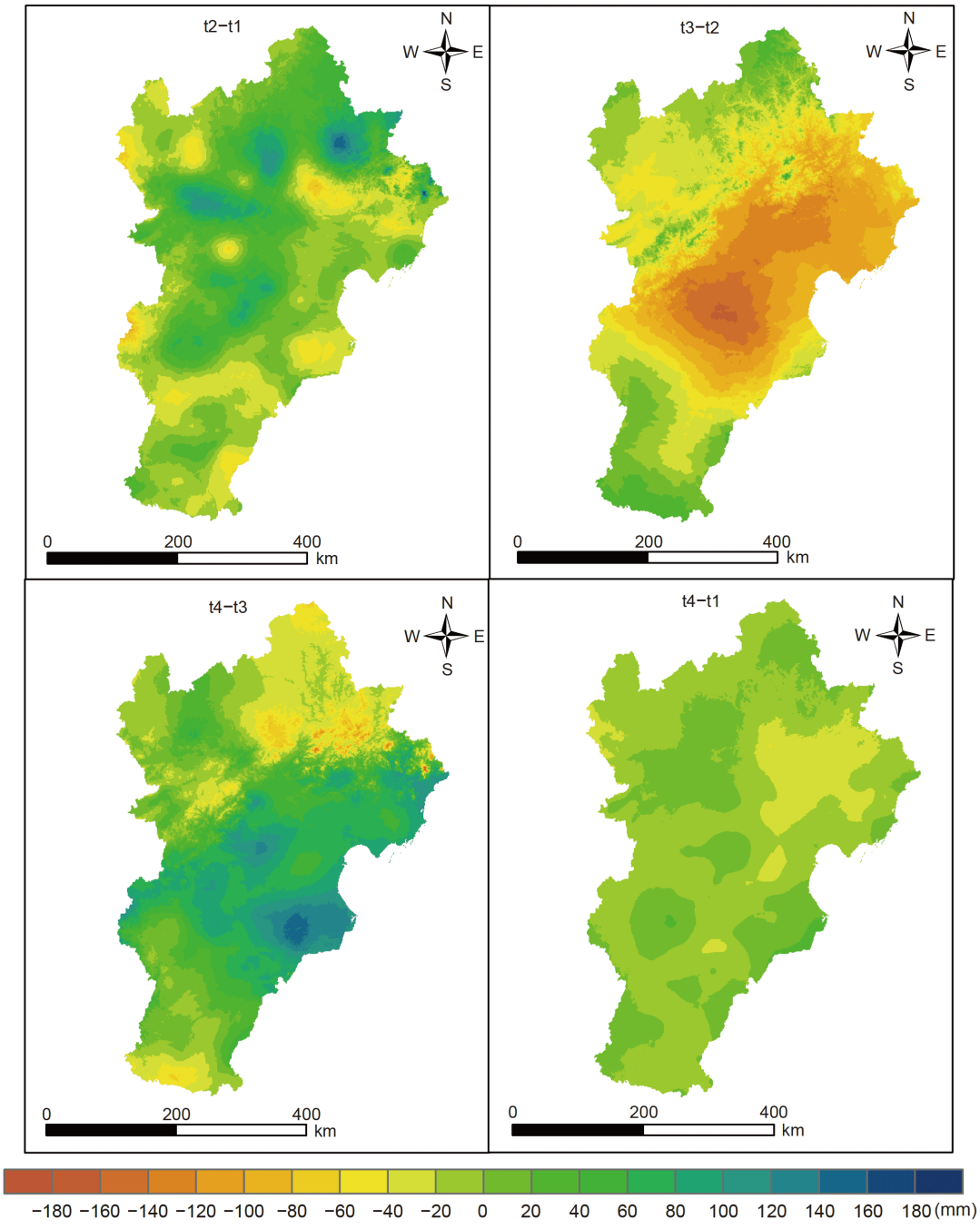


图 15　京津冀地区降水量变化趋势

(a) t2时期年平均降水量减去t1时期年平均降水量; (b) t3时期年平均降水量减去t2时期年平均降水量; (c) t4时期年平均降水量减去t3时期年平均降水量; (d) t4时期年平均降水量减去t1时期年平均降水量

本文在瑞典隆德大学、德国波斯坦气候影响研究所和德国也纳大学联合开发的全球植被动态模型与生态系统综合模拟器集成模型(LPJ-GUESS)框架下(Smith等, 2001, 2014; Bagnara等, 2019), 将碳储量状态变量曲线引入HASM方法, 建立了模型-数据同化算法(简记为HASM-MD), 实现了连续时间序列碳储量的三维空间曲面建模(详见网络版附录6).

我们以中国植被图为参考(中国植被图编辑委员

会, 2007), 对LPJ-GUESS 模型的植被功能型进行了修正. 京津冀地区修正后的植被功能型包括冷温带和温带落叶针叶林、冷温带和温带山地针叶林、温带针叶林、温带阔叶落叶林和温带草地(C3). 与修正的植被功能型呼应, 对最冷月和最暖月月平均温度以及生存积温等气候参数进行相应调整(表8).

LPJ-GUESS集成模型的气候输入数据包括月平均气温、月平均降水、月平均日照百分率、月降雨天数和年平均二氧化碳浓度. 这些气候要素数据源自从京津冀及其周边地区328个气象台站中符合LPJ-GUESS模型的45个气象台站(如图5中的红色气象台站), 气候要素曲面由HASM生成.

根据第六次(1999~2003年)、第七次(2004~2008年)和第八次(2009~2013年)国家森林资源清查数据, 我们整理形成了2003年、2008年和2013年的京津冀地区林地分布. 2013~2017年期间, 我们在京津冀地区采集了121个碳储量样方数据, 用于精度验证(图16). 各样方的采集参数包括每棵树的地理坐标、树种、树干1.3m处胸径和树高; 每棵树的生物量由单木生物量方程给出, 碳储量由含碳系数乘以生物量获得(李海奎和雷渊才, 2010). 验证结果显示, LPJ-GUESS 模型的平均绝对值误差和平均相对误差分别为2.084kg m^{-2}和68%, 而模型-数据同化算法(HASM-MD)的平均绝对值误差和平均相对误差分别为0.848kg m^{-2}和28%. 也就是说, 模型-数据同化算法使LPJ-GUESS模型的精度提高了40%. 根据HASM-MD的模拟结果, 京津冀地区2013年林地面积、碳密度和碳储量分别为37.14km^2、3.074kg m^{-2}和114.17Tg.

根据Mann-Kendall趋势分析法(Mann, 1945; Kendall, 1948), 在2001~2015年期间, 京津冀林地面积有明显增加趋势, 平均年增长率为$1.18\times10^5$$km^2$ a^{-1}, 置信度为0.001的β=1.325. 值得关注的是, 2015年的林地面积与2001年相比增加了75%; 2008年之前的平均增长率为$0.34\times10^5$$hm^2$ a^{-1}, 置信度为0.005的β=0.311; 而2008年以后的年平均增长呈下降趋势, 置信度为0.1的β=−0.193.

在2001~2015年期间, 因植树造林形成的林地碳储量呈显著的增长趋势, 置信度为0.01的β=4.325. 碳储量增加了90%, 平均增长率为4.020Tg a^{-1}. 碳密度也有很明显的增长趋势, 2015年与2001年相比, 增长了9%, 平均增长率为0.017kg m^{-2} a^{-1}. 然而, 京津冀地区林地净碳储量在2008年之后有下降趋势, 置信度为0.1的β=−0.403, 2008年之前呈较强的增长趋势, 置信度为0.05的β=0.603. 因此, 2001~2015年平均净增长趋势较弱, 置信度为0.1的β系数仅为0.003.

为了识别2001~2015年期间林地覆盖与碳储量的关系, 我们将碳储量区分为2001年之前已有原始林地碳储量和2001年后造林碳储量. 根据Mann-Kendall趋势分析结果, 在2001~2015年期间, 原始林的碳密度有明显增长趋势, 置信度为0.01的β=0.255, 碳密度增加了3.518kg m^{-2}; 然而, 由于原始林面积萎缩, 原始林碳储量减少了10.035Tg. 造林碳储量显持续增加趋势, 15年时间里增加了67.687Tg, 置信度为0.01的β=4.765 (图17).

在2001~2015年期间, 虽然由于森林损失引起的碳储量年减少量为4.147Tg, 但植树造林和森林砍伐共同作用下的林地覆被变化对碳储量的贡献从平均每年−1.996Tg变为3.656Tg, 其中造林碳储量平均年增长率为4.512Tg, 置信度为0.01的增长趋势为β=0.452.

总之, 在2001~2015年期间, 京津冀地区林地面积平均年增加率为1180km^2 a^{-1}, 十五年间净增面积为16550 km^2, 其中由于造林使林地面积扩张29350km^2,

表 8 对应植被功能型(PFTs)的气候参数[a)]

植被功能型	$T_{c,min}$(℃)	$T_{c,max}$(℃)	$T_{w,max}$(℃)	$T_{w\text{-}c,min}$(℃)	GDD_{min}(℃)
冷温带和温带落叶针叶林	–	−13	23.5	35	350
冷温带和温带山地针叶林	−32.5	−13	23.5	–	600
温带针叶林	−13	3	–	–	900
温带阔叶落叶林	−32.5	3	–	–	1200
温带草地(C3)	–	14	–	–	0

a) $T_{c,min}$和$T_{c,max}$分别为最冷月的月平均温度下界和上界, $T_{w,max}$和$T_{w\text{-}c,min}$分别为最暖月的月平均温度上界和下界; GDD_{min}为生存积温的下界

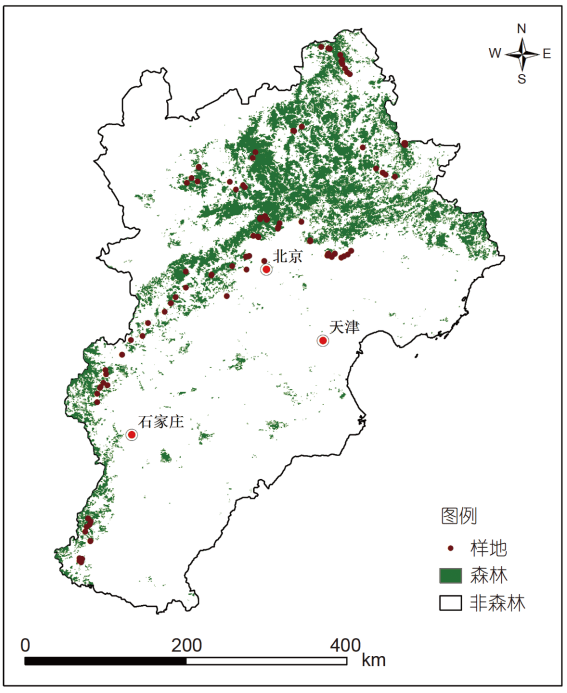


图 16　2013年京津冀地区林地分布

由于森林采伐和自然死亡是林地面积缩减12800km^2. 碳密度由2001年的2.839kg C m^{-2}增长到2015年的3.079kg C m^{-2}. 碳储量年平均增长率为4.020Tg a^{-1}, 十五年间净增56.282Tg, 其中原生林贡献48.807Tg, 植树造林贡献66.317Tg, 森林采伐和自然死亡使碳储量损失58.841Tg.

7　讨论与结论

京津冀地区海拔高度、气温、降水和碳储量等生态环境要素曲面建模案例表明, 通过运用HASM方法集成外蕴量和内蕴量, 使基于生态环境建模基本定理的空间升尺度、空间降尺度、空间插值、数据融合和模型-数据同化等算法的精度大幅度提高.

目前, 生态环境曲面建模基本定理亟待解决以下理论问题和应用基础问题. 理论问题包括: (1) Weingarten方程组和Codazzi方程组的物理含义? (2) HASM优化控制条件可否替代Weingarten方程组? (3) HASM有限差分离散将曲面论基本定理由解决局地问题推广至解决全局问题, 在理论上如何解释? (4) 在HASM方程组中, 交叉项取舍对模拟结果误差会有多大影响? (5) HASM参数如何影响其求解精度和运算速度. 三大应用基础问题包括: (1) 亟待解决悬崖和断裂带等生态环境曲面突变现象的高精度模拟问题, 实现从只能模拟光滑曲面到既能模拟光滑曲面、也能模拟突变曲面的转变; (2) 亟待解决多曲面耦合问题, 实现从单要素曲面建模到多要素曲面建模的转变; (3) 亟待解决生态环境曲面四维建模问题, 实现从静态模拟到三维动态

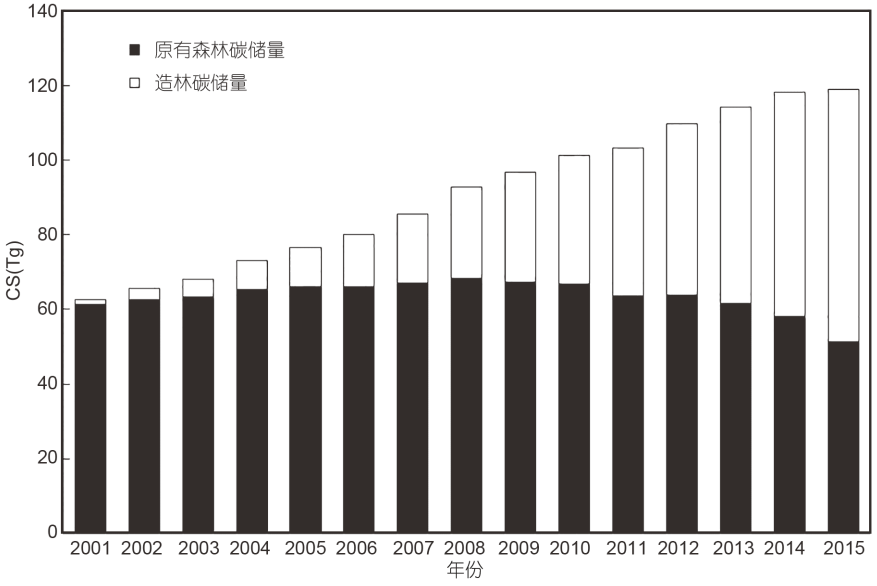


图 17　原始林碳储量和造林碳储量与林地总碳储量的比例关系

模拟的转变.

另外, 任何一个单一模型都无法捕捉生态环境所有层面的动态机制, 为了解决这个问题, 需要进行模型耦合(IPBES, 2016). 模型耦合包括松散耦合和紧凑耦合两类, 在模型的松散耦合中, 一个模型的输出是另一个模型的输入, 不考虑模型之间的相互反馈, 保持了每个模型的特征和优势; 当系统要素的相互反馈对模拟结果比较重要时, 需要进行模型的紧凑耦合(Verburg等, 2013). 松散耦合简单易行, 但会传播和放大各个模型的不确定性, 而且这种不确定性很难跟踪和量化. 紧凑耦合的模拟结果更贴近实际、精度较高, 但运算成本高、技术难度大. 基于生态环境曲面建模基本定理的模型耦合是我们亟待解决的第四个应用基础问题.

致谢 本文所使用的全球气候模式气候变化预估数据, 是由国家气候中心研究人员对数据进行的整理、分析和惠许使用(http://www.nmic.gov.cn). 原始数据由各模式组提供, 由WGCM(JSC/CLIVAR working group on coupled modelling)组织PCMDI(program for climate model diagnosis and intercomparison)搜集归类, 美国能源部科学办公室资助模式数据集的维护.

参考文献

李海奎, 雷渊才, 主编. 2010. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社

李志林, 朱庆. 2000. 数字高程模型. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社

刘学军, 卢华兴, 仁政, 任志峰. 2007. 论DEM地形分析中的尺度问题. 地理研究, 26: 433–442

吕一河, 傅伯杰. 2001. 生态学中的尺度与尺度转换方法. 生态学报, 21: 2096–2105

隋立芬, 宋力杰, 柴洪洲. 2010. 误差理论与测量平差基础. 北京: 测绘出版社

汤国安, 刘学军, 闾国年. 2005. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社

王光霞, 朱长青, 史文中, 张国芹. 2004. 数字高程模型地形描述精度的研究. 测绘学报, 33: 168–173

魏克让, 江聪世. 2003. 空间数据的误差处理. 北京: 科学出版社

杨志强. 2002. 误差理论与数据优化处理. 西安: 西安地图出版社

岳天祥, 杜正平, 刘纪远. 2004. 高精度曲面建模与误差分析. 自然科学进展, 14: 300–306

岳天祥, 等, 著. 2017. 地球表层系统模拟分析原理与方法. 北京: 科学出版社

岳天祥, 边少锋, 王劲峰, 王伟. 2020. 空间分析与系统模拟. 北京: 科学出版社

Ahlberg J H, Nilson E N, Walsh J L. 1967. The Theory of Splines and Their Application. New York: Academic Press

Akima H. 1978a. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. ACM Trans Math Softw, 4: 148–159

Akima H. 1978b. Algorithm 526: Bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. ACM Trans Math Softw, 4: 160–164

Bagnara M, Silveyra Gonzalez R, Reifenberg S, Steinkamp J, Hickler T, Werner C, Dormann C F, Hartig F. 2019. An R package facilitating sensitivity analysis, calibration and forward simulations with the LPJ-GUESS dynamic vegetation model. Environ Model Softw, 111: 55–60

Bengtsson B E, Nordbeck S. 1964. Construction of isarithms and isarithmic maps by computers. BIT, 4: 87–105

Birkhoff G, Garabedian H L. 1960. Smooth surface interpolation. J Math Phys, 39: 258–268

Brill K F, Uccellini L W, Manobianco J, Kocin P J, Homan J H. 1991. The use of successive dynamic initialization by nudging to simulate cyclogenesis during GALE IOP 1. Meteorol Atmos Phys, 45: 15–40

Chambers J Q, Asner G P, Morton D C, Anderson L O, Saatchi S S, Espírito-Santo F D B, Palace M, Souza Jr C. 2007. Regional ecosystem structure and function: Ecological insights from remote sensing of tropical forests. Trends Ecol Evol, 22: 414–423

Chen C F, Yue T X. 2010. A method of DEM construction and related error analysis. Comput Geosci, 36: 717–725

Chen C F, Yue T X, Dai H L, Tian M Y. 2013. The smoothness of HASM. Int J Geogr Inf Sci, 27: 1651–1667

Chen C F, Yue T X, Li Y Y. 2012. A high speed method of SMTS. Comput Geosci, 41: 64–71

Cheng W M, Zhou C H, Chai H X, Zhao S M, Liu H J, Zhou Z P. 2011. Research and compilation of the geomorphologic atlas of the People's Republic of China (1:1000000). J Geogr Sci, 21: 89–100

Crow W T, Berg A A, Cosh M H, Loew A, Mohanty B P, Panciera R, de Rosnay P, Ryu D, Walker J P. 2012. Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. Rev Geophys, 50: RG2002

De Boor C. 1962. Bicubic spline interpolation. J Math Phys, 41: 212–218

Emili E, Popp C, Wunderle S, Zebisch M, Petitta M. 2011. Mapping particulate matter in alpine regions with satellite and ground-based measurements: An exploratory study for data assimilation. Atmos Environ, 45: 4344–4353

Foley T A, Nielson G M. 1980. Multivariate interpolation to scattered

data using delta iteration. In: Cheney E W, ed. Approximation Theory III. New York: Academic Press

Franke R. 1982. Scattered data interpolation: Tests of some methods. Math Comp, 38: 181

Fry J, Guber A K, Ladoni M, Munoz J D, Kravchenko A N. 2017. The effect of up-scaling soil properties and model parameters on predictive accuracy of DSSAT crop simulation model under variable weather conditions. Geoderma, 287: 105–115

Hamed K H. 2009. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data. J Hydrol, 365: 86–94

Harder R L, Desmarais R N. 1972. Interpolation using surface Splines. J Aircraft, 9: 189–191

IPBES. 2016. The Methodological Assessment Report on Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem Services. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity Ecosystem Services, Bonn, Germany

IPBES. 2019. Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity Ecosystem Services, Bonn, Germany

Isaaks E H, Srivastava R M. 1989. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press

Kendall M G. 1948. Rank Correlation Methods. London UK: Griffin, London

Krige D G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. J Chem Metall Min Soc South Africa, 52: 119–139

Legendre L, Legendre P. 1983. Numerical Ecology. Amsterdam: Elsevier Scientific

Li J, Heap A D. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. Environ Model Softw, 53: 173–189

Li K, Jackson A, Livermore P W. 2014. Variational data assimilation for a forced, inertia-free magnetohydrodynamic dynamo model. Geophys J Int, 199: 1662–1676

Li Q Q, Yue T X, Wang C Q, Zhang W J, Yu Y, Li B, Yang J, Bai G C. 2013. Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: An application of artificial neural network approach. Catena, 104: 210–218

Li Q Q, Zhang H, Jiang X Y, Luo Y L, Wang C Q, Yue T X, Li B, Gao X S. 2017. Spatially distributed modeling of soil organic carbon across China with improved accuracy. J Adv Model Earth Syst, 9: 1167–1185

Li Z L. 2007. Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation. London: CRC Press

Liu Y, Yue T X, Zhang L L, Zhao N, Zhao M M, Liu Y. 2018. Simulation and analysis of XCO_2 in North China based on High Accuracy Surface Modeling. Environ Sci Pollut Res, 25: 27378–27392

Long G E. 1980. Surface approximation: A deterministic approach to modelling spatially variable systems. Ecol Model, 8: 333–343

Lv G N, Xiong L Y, Chen M, Tang G A, Sheng Y H, Liu X J, Song Z Y, Lu Y Q, Yu Z Y, Zhang K, Wang M Z. 2017. Chinese progress in geomorphometry. J Geogr Sci, 27: 1389–1412

Magnussen S, Næsset E, Wulder M A. 2007. Efficient multiresolution spatial predictions for large data arrays. Remote Sens Environ, 109: 451–463

Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13: 245

Maude A D. 1973. Interpolation—Mainly for graph plotters. Comput J, 16: 64–65

Misaghian N, Assareh M, Sadeghi M T. 2018. An upscaling approach using adaptive multi-resolution upgridding and automated relative permeability adjustment. Comput Geosci, 22: 261–282

Mitchell M N B. 2012. Data Fusion: Concepts and Ideas. Berlin, Germany: Springer-Verlag

Nichols N K. 2010. Mathematical concepts of data assimilation. In: Lahoz W, Khattatov B, Menard R, eds. Data Assimilation: Making Sense of Observations. Berlin: Springer. 13–39

Oliver M A, Webster R. 1990. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. Int J Geogr Inf Syst, 4: 313–332

Phillips J D. 2002. Global and local factors in earth surface systems. Ecol Model, 149: 257–272

Ponsar S, Luyten P, Dulière V. 2016. Data assimilation with the ensemble Kalman filter in a numerical model of the North Sea. Ocean Dyn, 66: 955–971

Schneider B. 2001. Phenomenon-based specification of the digital representation of terrain surfaces. Trans GIS, 5: 39–52

Schoenberg I J. 1946. Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions. Quar Appl Math, 4: 45–99, 112–141

Schroeder L D, Sjoquist D L. 1976. Investigation of population density gradients using trend surface analysis. Land Economics, 52: 382–392

Shepard D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference. New York: Association for Computing Machinery

Shi W J, Liu J Y, Du Z P, Stein A, Yue T X. 2011. Surface modelling of soil properties based on land use information. Geoderma, 162: 347–357

Shi W J, Yue T X, Du Z P, Wang Z, Li X W. 2016. Surface modeling of soil antibiotics. Sci Total Environ, 543: 609–619

Smith B, Prentice I C, Sykes M T. 2001. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: Comparing two contrasting approaches within European climate space. Glob Ecol Biogeogr, 10: 621–637

Smith B, Wårlind D, Arneth A, Hickler T, Leadley P, Siltberg J, Zaehle S. 2014. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model. Biogeosciences, 11: 2027–2054

Somasundaram D. 2005. Differential Geometry. Harrow: Alpha Science International

Talmi A, Gilat G. 1977. Method for smooth approximation of data. J Comput Phys, 23: 93–123

Tse R O C, Gold C. 2004. TIN meets CAD—Extending the TIN concept in GIS. Future Generation Comput Syst, 20: 1171–1184

Usery E L, McMaster R B. 2005. Introduction to the UCGIS research agenda. In: Usery E L, McMaster R B, eds. A Research Agenda for Geographic Information Science. London: CRC Press. 1–16

Wang H W, Wang Y H. 2012. Analysis of spatial interpolation methods. In: Qian Z H, Cao L, Su W L, Wang T K, Yang H M, eds. Recent Advances in Computer Science and Information Engineering (Lecture Notes in Electrical Engineering Vol. 129). Berlin: Springer. 507–512

Verburg P H, Tabeau A, Hatna E. 2013. Assessing spatial uncertainties of land allocation using a scenario approach and sensitivity analysis: A study for land use in Europe. J Environ Manage, 127: S132–S144

Yue T X. 2011. Surface Modelling: High Accuracy and High Speed Methods. New York: CRC Press

Yue T X, Chen C F, Li B L. 2010a. An adaptive method of high accuracy surface modeling and its application to simulating elevation surfaces. Trans GIS, 14: 615–630

Yue T X, Chen C F, Li B L. 2012. A high-accuracy method for filling voids and its verification. Int J Remote Sens, 33: 2815–2830

Yue T X, Du Z P, Lu M, Fan Z M, Wang C L, Tian Y Z, Xu B. 2015c. Surface modeling of ecosystem responses to climatic change in Poyang Lake Basin of China. Ecol Model, 306: 16–23

Yue T X, Du Z P, Song D J, Gong Y. 2007. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. Geomorphology, 91: 161–172

Yue T X, Fan Z M, Chen C F, Sun X F, Li B L. 2011. Surface modelling of global terrestrial ecosystems under three climate change scenarios. Ecol Model, 222: 2342–2361

Yue T X, Liu Y, Zhao M W, Du Z P, Zhao N. 2016d. A fundamental theorem of Earth's surface modelling. Environ Earth Sci, 75: 751

Yue T X, Song D J, Du Z P, Wang W. 2010b. High-accuracy surface modelling and its application to DEM generation. Int J Remote Sens, 31: 2205–2226

Yue T X, Tian Y Z, Liu J Y, Fan Z M. 2008. Surface modeling of human carrying capacity of terrestrial ecosystems in China. Ecol Model, 214: 168–180

Yue T X, Wang Q, Lu Y M, Xin X P, Zhang H B, Wu S X. 2010c. Change trends of food provisions in China. Glob Planet Change, 72: 118–130

Yue T X, Wang S H. 2010. Adjustment computation of HASM: A high-accuracy and high-speed method. Int J Geogr Inf Sci, 24: 1725–1743

Yue T X, Wang Y A, Chen S P, Liu J Y, Qiu D S, Deng X Z, Liu M L, Tian Y Z. 2003. Numerical simulation of population distribution in China. Population Environ, 25: 141–163

Yue T X, Wang Y A, Liu J Y, Chen S P, Qiu D S, Deng X Z, Liu M L, Tian Y Z, Su B P. 2005a. Surface modelling of human population distribution in China. Ecol Model, 181: 461–478

Yue T X, Wang Y A, Liu J Y, Chen S P, Tian Y Z, Su B P. 2005b. SMPD scenarios of spatial distribution of human population in China. Popul Environ, 26: 207–228

Yue T X, Wang Y F, Du Z P, Zhao M W, Li Zhang L, Zhao N, Lu M, Larocque G R, Wilson J P. 2016a. Analysing the uncertainty of estimating forest carbon stocks in China. Biogeosciences, 13: 3991–4004

Yue T X, Zhang L L, Zhao M W, Wang Y F, Wilson J. 2016c. Space- and ground-based CO_2 measurements: A review. Sci China Earth Sci, 59: 2089–2097

Yue T X, Zhang L L, Zhao N, Zhao M W, Chen C F, Du Z P, Song D J, Fan Z M, Shi W J, Wang S H, Yan C Q, Li Q Q, Sun X F, Yang H, Wilson J, Xu B. 2015b. A review of recent developments in HASM. Environ Earth Sci, 74: 6541–6549

Yue T X, Zhao M W, Zhang X Y. 2015a. A high-accuracy method for filling voids on remotely sensed XCO_2 surfaces and its verification. J Cleaner Production, 103: 819–827

Yue T X, Zhao N, Fan Z M, Li J, Chen C F, Lu Y M, Wang C L, Gao J, Xu B, Jiao Y M, Wilson J P. 2019. Methods for simulating climate scenarios with improved spatiotemporal specificity and less uncertainty. Glob Planet Change, 181: 102973

Yue T X, Zhao N, Fan Z M, Li J, Chen C F, Lu Y M, Wang C L, Xu B, Wilson J. 2016b. CMIP5 downscaling and its uncertainty in China. Glob Planet Change, 146: 30–37

Yue T X, Zhao N, Ramsey R D, Wang C L, Fan Z M, Chen C F, Lu Y M, Li B L. 2013b. Climate change trend in China, with improved accuracy. Clim Change, 120: 137–151

Yue T X, Zhao N, Yang H, Song Y J, Du Z P, Fan Z M, Song D J. 2013a. A multi-grid method of high accuracy surface modeling and its validation. Trans GIS, 17: 943–952

Zhang L L, Yue T X, Wilson J P, Wang D Y, Zhao N, Liu Y, Liu D D,

Du Z P, Wang Y F, Lin C, Zheng Y Q, Guo J H. 2017. Modelling of XCO_2 surfaces based on flight tests of TanSat instruments. Sensors, 16: 1818

Zhao M W, Yue T X, Zhang X Y, Sun J L, Jiang L, Wang C. 2017b. Fusion of multi-source near-surface CO_2 concentration data based on high accuracy surface modeling. Atmos Pollution Res, 8: 1170–1178

Zhao M W, Yue T X, Zhao N, Yang X, Wang Y, Zhang X. 2015. Parallel algorithm of a modified surface modeling method and its application in digital elevation model construction. Environ Earth Sci, 74: 6551–6561

Zhao M W, Zhang X Y, Yue T X, Wang C, Jiang L, Sun J L. 2017a. A high-accuracy method for simulating the XCO_2 global distribution using GOSAT retrieval data. Sci China Earth Sci, 60: 143–155

Zhao N, Lu N, Chen C, Li H, Yue T, Zhang L, Liu Y. 2017b. Mapping temperature using a Bayesian statistical method and a high accuracy surface modelling method in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Met Apps, 24: 571–579

Zhao N, Yue T, Chen C, Zhao M, Du Z. 2018b. An improved HASM method for dealing with large spatial data sets. Sci China Earth Sci, 61: 1078–1087

Zhao N, Yue T, Chen C, Zhao M, Fan Z. 2018c. An improved statistical downscaling scheme of Tropical Rainfall Measuring Mission precipitation in the Heihe River basin, China. Int J Climatol, 38: 3309–3322

Zhao N, Yue T, Li H, Zhang L, Yin X, Liu Y. 2018a. Spatio-temporal changes in precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Atmos Res, 202: 156–168

Zhao N, Yue T, Zhou X, Zhao M, Liu Y, Du Z, Zhang L. 2017a. Statistical downscaling of precipitation using local regression and high accuracy surface modeling method. Theor Appl Climatol, 129: 281–292

Zhao C Y, Nan Z G, Cheng G D. 2005. Methods for modelling of temporal and spatial distribution of air temperature at landscape scale in the southern Qilian mountains, China. Ecol Model, 189: 209–220

Zhu A X. 2005. Research issues on uncertainty in geographic data and GIS-based analysis. In: Usery E L, McMaster R B, eds. A Research Agenda for Geographic Information Science. London: CRC Press. 197–223

Zienkiewlcz O C. 1967. The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. London: McGraw Hill

(责任编委: 李新)