

中国西部主要台站积雪深度的空间插值研究

唐国栋 柯长青

南京大学地理信息科学系, 南京 210093

摘要 应用空间插值方法, 对中国西部地区 ($27.17^{\circ}\sim 48.05^{\circ}\text{N}$, $79.05^{\circ}\sim 103.57^{\circ}\text{E}$) 110个气象台站的观测数据进行空间内插, 研究积雪分布特征。结果表明, 普通 Kriging 法和 Cokriging 法都能够反映出研究区积雪深度分布的空间结构特征, 与实际情况比较吻合。但相比之下, Cokriging 法的精度更高, 局部特征的反映更佳。分析发现, 影响插值结果精度的主要因素是研究区内气象台站稀少, 且空间分布很不均匀。通过合理的采样设计, 选择合适的插值方法, 并考虑地形、气候等影响积雪分布的因素将有利于改善空间插值精度。

关键词 积雪深度 普通 Kriging 法 Cokriging 法 中国西部地区

文章编号 1006-9585 (2007) 04-0566-07 **中图分类号** P208 **文献标识码** A

Study on Spatial Interpolation of Snow Depth from Observatories in Western China

TANG Guo-Dong and KE Chang-Qing

Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The spatial interpolation methods are utilized for study on spatial distribution of snow depth from 110 observatories in the west of China. Both the results of ordinary Kriging and Cokriging represent the spatial structure of snow depth distribution, according to the reality. However, the accuracy of Cokriging is higher than Kriging and the result of Cokriging reflects local characteristics better. The main reasons which affect the precision are the small number of observatories and their asymmetric spatial distribution. The precision of spatial interpolation can be improved through reasonable design of sampling, suitably selecting interpolation methods, and considering the influencing factors of snow distribution, such as terrain and climate.

Key words snow depth, ordinary Kriging, Cokriging, western China

1 引言

积雪作为一类特殊的下垫面自然景观, 对气候环境有着深刻的影响。相关研究表明中国西部地区积雪异常和变化与周围地区气候的变化有着密切的联系^[1~5]。

积雪资料主要分为气象台站观测资料和卫星

遥感监测资料两种。由于可见光卫星数据易受天气状况影响, 微波遥感技术起步较晚, 资料较少, 不利于年际变化的研究。因此, 气象台站的观测资料是目前研究积雪变化和分布特征最为可靠和应用最多的积雪资料。但是, 气象台站的空间分布受到地理环境等多方面因素的制约。尤其是位于高海拔的中国西部地区, 气象台站分布稀少且很不均匀, 资料的空间连续性差, 也无法依靠增

加台站数量或改变气象台站的空间分布来获得更好的观测资料。因此，在目前有限的积雪观测资料基础上分析中国西部地区积雪的空间分布特征，对于研究该地区积雪分布对我国及周边地区气候环境的变化有着极其重要的意义。本文利用空间插值方法来研究中国西部地区积雪深度的空间分布特征。空间插值方法已被广泛应用于气温、降水等气象要素的空间分布和变化研究。李新等^[6]使用反距离加权、趋势面、Kriging 插值、Cokriging 插值和综合方法对青藏高原 1961~1990 年 1 月平均气温进行了比较深入的空间插值的比较研究。但是，利用空间插值方法研究积雪深度的分布还比较少，冯学智等^[7]运用 Kriging 插值方法对北疆地区 1981~1990 年 1 月气象台站的积雪深度观测资料进行过空间插值研究，研究区的空间尺度比较小。

本文以 113 个分布在西藏、青海、新疆等省区的气台站的积雪深度观测数据为样本数据，分析其空间分布特征，选择合适的空间插值方法，进而分析区域内积雪深度的空间分布和变化特征，以及影响插值结果精度的原因，并探讨改进的途径。

2 研究区和积雪深度数据分析

2.1 研究区介绍

研究区位于中国西部地区（27.17~48.05°N，79.05~103.57°E），包含新疆、西藏、青海、甘肃、四川、云南、内蒙古等省区的全部或一部分（图 1）。研究区的平均海拔是 2 936.24 m，地势起伏很大，南部的青藏高原海拔较高，北部的塔里木盆地、准格尔盆地海拔较低。

2.2 积雪深度数据分析

地面气象台站主要分布在新疆、西藏、青海和四川，在甘肃和云南有少数气象台站分布（图 1）。气象台站的数量为 113 个，站点分布稀疏且不均匀，在新疆南部地区和西藏北部地区鲜有站点分布。气象台站不仅在空间上存在不均匀性，而且观测的数据在时间上存在不一致性，其中 31 个气象台站自 1965 年 5 月起有气象观测记录，大部分气象台站从 20 世纪 70 年代末或 80 年代初开始才有连续的积雪深度观测数据。因此，为了分析研究区内积雪分布的情况，本文先对气象台站的观测数据进行了一定的计算、统计分析、空间相关性分析和空间异质性分析等处理。

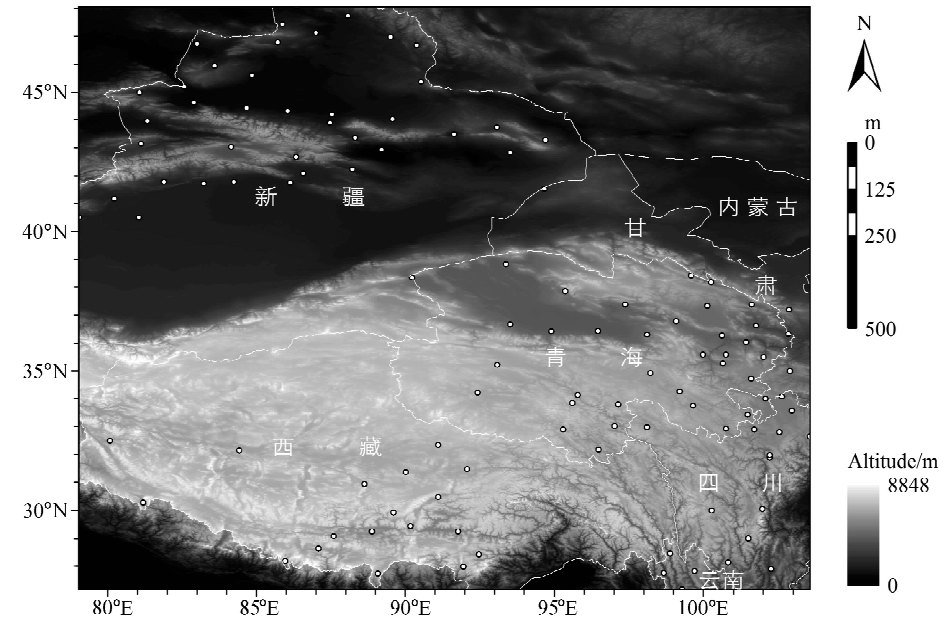


图 1 研究区气象台站的空间分布
Fig. 1 The spatial distribution of observatories in the research area

2.2.1 初步的统计分析

研究区平均海拔高，积雪多分布于高山区域，终年不化，或者融化很少。考虑到气象站积雪深度观测数据的记录方法，本文先对每个站记录的积雪深度数据求取年平均。由于样本数据的分布特征将影响最后插值结果的精度，所以须对样本数据进行一定的统计分析。统计结果显示：年均雪深的数值范围跨度很大，从 0~2 942.29 mm 不等，113 个台站的平均年均雪深为 325.14 mm，中值为 66.727 mm。将这些统计数据与直方图（图略）结合考虑，113 个台站的年均雪深不服从正态分布。因此，必须对这些数据作进一步的处理。首先，从这些数据中剔除一些不利于空间插值的数据（比如精度有问题的台站数据、记录数据年份太少的台站数据等），最终选择 110 个站点作为样本。其次，为了提高插值精度，对雪深数据进行一些变换，使其能服从或近似服从正态分布。常用数据变换有平方根、立方根、对数等，经试验发现，进行对数变换后数据最接近正态分布。变换后，最小值为 0.30228，最大值为 7.9869，平均值为 4.2711，中值为 4.2571。

2.2.2 空间分布特性分析

空间插值研究的理论基础是地理空间中研究对象的空间分布规律。因此，须对年均雪深的空间分布特性进行分析，掌握它的空间分布规律。

空间分布特性包括空间相关性和空间异质性^[8]。空间相关性又包括空间自相关性和空间异相关性。空间自相关性可以用 Tobler 定律来描述，它是空间插值的基本假设前提。空间异相关是不同要素在空间分布上的相关。空间异质性描述为要素在空间上的不均匀分布，也称为空间变异性。

图 2 是样本数据的半变异函数，图中每一个点表示一个样本数据对，半变异函数值表示样本

数据对间的不相似程度（变异性）。根据 Tobler 定律，空间上距离较近的点具有比较大的相似性，因此理想情况下，图 2 应表现为 h 值越小， γ 值也越小；随着 h 值的递增，值会越来越大，当 h 值达到一定大小（比如 h_0 ）时， γ 值会趋于稳定，若两样本数据间的距离大于 h_0 ，则这对样本数据不存在空间自相关性。由图 2 可知，110 个台站测得的年均雪深在空间上具有自相关性。

在自相关分析的基础上，分析样本数据在不同的方向上是空间变异性。图 3 是空间变异性分析。图 3a 中显示的是东西向和南北向的变化趋势，投影在垂直平面上的两条趋势线几乎成直线，倾斜度很小，说明沿南北向（即 Y 轴方向）样本值逐渐增加，但增量很少，东西向（即 X 轴负方向）上也是如此。通过逐渐改变方向，发现在图 3b 状态下样本数据的变异性最大，垂直平面上的趋势线在东北—西南（北偏东 36°）方向上变化比较大。这就说明，样本数据具有各向异性。

空间插值除了考虑待插值要素本身外还可以结合其他要素^[9]。当样本数据与其他要素（如高度、经纬度等）具有很好的相关性时，将这些协变量引入到插值过程中，插值模型将会对样本数据具有更好的表现力，插值结果的平均误差也较低，这样的模型被称为异相关模型，例如多元回归方法、Cokriging 法、GIDS 模型和 ANUSPLIN 模型等。因此，为了能更好地反映研究区积雪分布状况，将协变量（如高度、经纬度等）引入，对雪深与高度和经纬度的相关性分析结果表明：年均雪深与高度和经度的相关系数分别为 -0.475 和 -0.378，显著水平为 5%；年均雪深与纬度的相关系数为 0.613，显著水平为 1%。雪深和高度的负相关关系的主要原因在于气象台站主要位于低海拔地区（平均海拔：2 592 m），在青藏高原等高海拔地区鲜有台站分布，所以无法正确反映

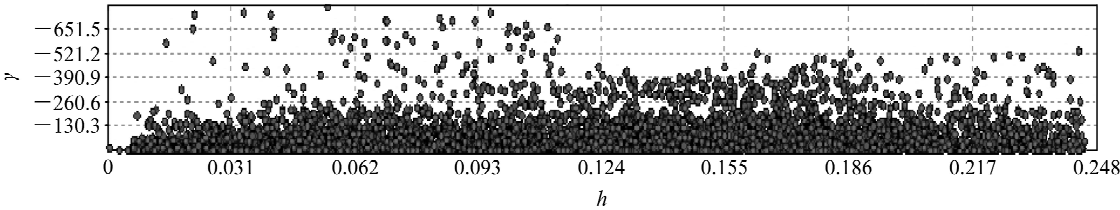


图 2 半变异函数图 (h 为样本对的距离; γ 为半变异函数值)
Fig. 2 Semivariogram (h : distance of sample pairs; γ : semivariogram value)

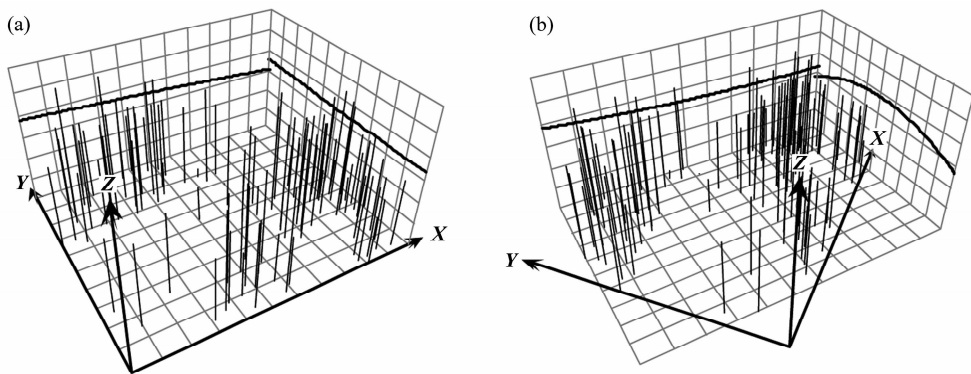


图 3 空间变异性分析：(a) 南北、东西向空间变异性；(b) 东北—西南（北偏东 36° ）、东南—西北向空间变异性。X：正东方向，Y：正北方向，Z：雪深

Fig. 3 Analysis of spatial variation: (a) north-south, west-east variation; (b) northeast-southwest (36°), southeast-northwest variation. X: east, Y: north, Z: depth of snow

雪深与高度的相关性。除了考虑垂直地带性对雪深的影响外，纬向地带性也不可忽略，从相关分析结果看，样本数据与纬度呈很强的正相关性，因此在进行插值时可以将纬度作为协变量考虑。

从样本数据的统计分析和空间相关分析结果中，可以得到这样的初步结论：样本数据经过对数变换后基本服从正态分布，适于空间插值研究；空间数据间具有空间自相关性和空间变异性，这是空间插值研究的基本前提；样本数据在空间分布上表现出全局趋势和各向异性；样本数据与纬度间相关性较大，将它引入到插值过程中有助于提高插值精度。

3 雪深插值

3.1 插值方法

插值结果的精度与插值方法的选择密切相关^[10]。现有的插值方法有很多种，如反距离加权法、样条函数法、趋势面分析、普通 Kring 法和 Cokriging 法等。反距离加权法是根据已知样本点与插值点间的欧氏距离来决定样本的加权系数，形式简单、应用广泛，但它作为局部插值算法在设定邻域空间范围和样本点的合理数目、幂函数或指数形式的空间加权以及对局部特异值的反映方面都存在一定的困难，并且无法描述空间各向异性。样条函数法是函数方法的一种，利用函数逼近曲面，大多用于特殊场合，如高度数据产生等高线，栅格数据的分辨率转换等。趋势面分析

不直接考虑距离与方向上的空间相关性，而是利用多项式对要素分布的总体特征进行拟合，根据有限的观测数据拟合曲面，以空间的视点诠释趋势和残差。普通 Kriging 法是地统计学方法的一种，建立在变异函数理论及结构分析基础上，是在有限区域内对区域化变量的取值进行最优无偏估计的一种方法^[11]。普通 Kriging 法在选取权重系数时考虑平均误差与误差方差，试图通过使误差方差最小等数学处理得出比较合理的加权系数^[12]。误差方差或半方差的估计是一个复杂的过程。首先通过空间数据探索分析样本数据的空间分布特征（相关性、变异性等），然后建立样本对空间距离与半方差之间的关系，得到经验变异函数，最后采用一种理论模型或者多个理论模型的组合进行拟合。通过将残差、协变量等引入，Kriging 法有很多变种，如析因 Kriging 法、Cokriging 法等。Cokriging 法将高度、经纬度等协变量引入，以提高模型的插值精度，但其前提条件是插值要素与协变量具有很好的相关性。

将统计分析和空间相关分析的结论与各种空间插值方法的特性相结合考虑，有助于选择合适的空间插值方法。由于样条函数法和趋势面法的插值精度通常低于反距离加权法和 Kriging 法^[13]，反距离加权法又无法反映各向异性，所以这 3 种方法均不适用于此次插值分析。故本文选取普通 Kriging 法和 Cokriging 法（纬度作为协变量）对年均雪深数据进行插值分析。

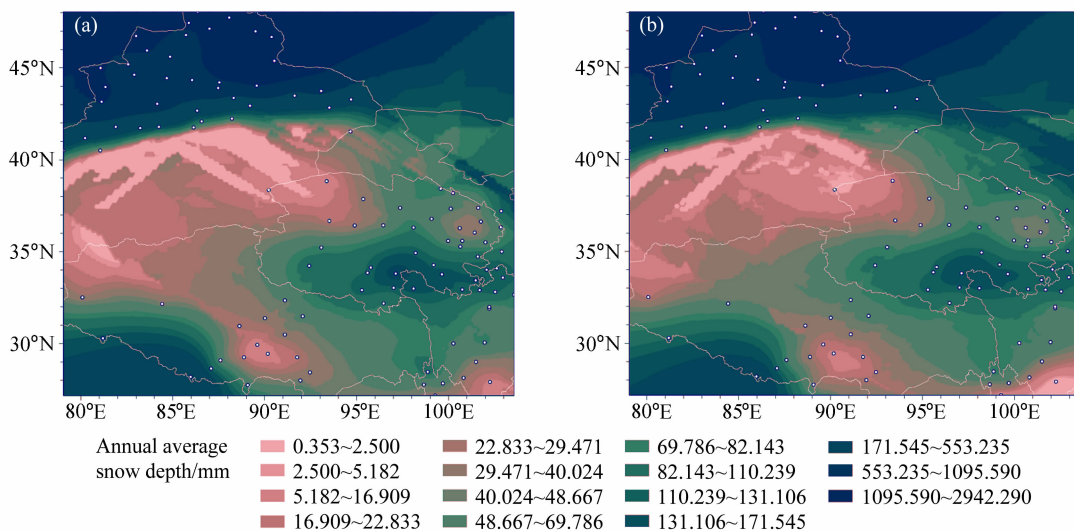


图 4 中国西部积雪深度的插值结果: (a) 普通 Kriging; (b) Cokriging 法

Fig. 4 The interpolation results of snow depth in the western China: (a) ordinary Kriging; (b) Cokriging

3.2 插值结果分析

图 4 是普通 Kriging 法和 Cokriging 法的插值结果。由于研究区位于高海拔且地形起伏明显, 气象台站分布稀少, 很多无人区域没有观测资料, 因此无法应用更多的实际观测资料对插值结果进行验证。本文分别采用定性的旁证和定量的交叉验证对插值结果进行验证。

首先, 将柯长青等^[14], 冯雪智等^[7], 李培基^[15], 崔彩霞等^[16], 徐兴奎等^[17], 刘玉洁等^[18]的研究与普通 Kriging 法的插值结果 (图 4a) 进行对比分析, 发现插值结果与积雪分布的实际情况比较相符。积雪深度的高值区主要位于高海拔的山区, 包括新疆北部地区、青藏高原西部的喜马拉雅山和青藏高原东部横断山地区等; 而藏北高原、藏南谷地和塔里木盆地等地区的插值结果比较小, 形成了四周边缘多雪, 内陆腹地少雪的空间分布特征, 并且积雪由西向东逐渐减少。但是, 插值在新疆南部呈现出很奇特的分布形态, 并且某些地区 (如藏北高原地区和准葛尔盆地) 积雪的一些局部空间分布特征没有得到充分反映。Cokriging 法的插值结果 (图 4 (b)) 与普通 Kriging 法相近, 但是由于考虑了纬向地带性的影响, 所以对局部特征的反映和站点分布较少地区积雪分布状况的描述都有所改善, 插值结果与实际积雪分布状况更接近。

其次, 文中又使用交叉验证法 (cross-valida-

tion) 对普通 Kriging 法和 Cokriging 法的插值结果进行了验证。交叉验证是把训练样本分为 m 份, 其中一份作为保留部分, 其余 $m-1$ 份作为训练部分, 应用训练部分估计保留部分与原来的保留部分进行比较分析。交叉验证结果为: 普通 Kriging 法的平均误差 (ME) 为 2.715, 均方差误差 (RMSE) 为 345.3; Cokriging 法的平均误差为 1.29, 均方差误差 (RMSE) 为 244.8。

验证结果表明: 普通 Kriging 法和 Cokriging 法都能在一定程度上反映中国西部地区积雪深度的整体空间分布特征, 但在台站分布较少的新疆南部和西藏北部插值精度较低。与普通 Kriging 法相比, Cokriging 法将纬度协变量引入, 插值精度有了一定的提高, 对局部地区积雪的空间分布估计有了一定改善, 但 Cokriging 法的插值结果还不够理想。究其原因主要在于: 一方面, 受到客观条件的制约, 研究区的空间尺度较大, 样本数据的样本空间不够大, 并且台站分布不均和代表性不够; 另一方面, Kriging 法是建立在一定的空间假设基础上的, 在内插过程中平滑掉了很多能够反映局部空间变化的信息, 造成某些局部地区插值结果不合理。

4 结论与讨论

本文利用中国西部地区 110 个气象台站的积

雪深度观测资料，通过空间内插对研究区的积雪分布状况进行分析研究。经过对样本数据的相关分析以及插值结果的评价，发现为了获得最好的插值结果，必须最大限度地将影响插值精度的因素考虑进去。影响插值精度的主要因素有样本数据的属性（包括样本容量、分布特征、采样质量等），积雪深度分布的影响因素（地形、气候条件等）和空间插值模型与算法的选择等。通过获取能够反映研究区积雪深度分布变化趋势的足够的样本数据，了解研究区先验的地理知识，并对数据进行统计分析和空间探索分析，经过反复实验，选择最优的空间插值方法，这样才能得到最优的插值结果。另外，在数据采样时，可以将遥感数据与地面观测数据结合起来以解决样本数据空间分布少而不均的问题，并使插值结果易于检验。

致谢 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所李新研究员为本文的写作提供了所需数据，在此深表谢意。

参考文献 (References)

[1] Wu T W, Qian Z A. The Relation between the Tibetan Winter Snow and the Asian Summer Monsoon and Rainfall: An Observational Investigation. *J. Climate*, 2003, **16**: 2038~2051

[2] 陈烈庭. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 在 1998 年长江流域洪涝中的作用. 大气科学, 2001, **25** (2): 184~192
Chen Lieting. The role of the anomalous snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau and ENSO in the Great Floods of 1998 in the Changjiang River Valley. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (2): 184~192

[3] 谢志辉, 罗勇. 青藏高原雪盖变化对我国气候的影响. 应用气象学报, 1999, **10**: 122~131
Xie Zhihui, Luo Yong. The effects of snow cover of Tibet Plateau on climate over China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, **10**: 122~131

[4] 钱永甫, 张艳, 郑宜群. 青藏高原冬春季积雪异常对中国春夏季降水的影响. 干旱气象, 2003, **31** (3): 1~7
Qian Yongfu, Zhang Yan, Zheng Yiqun. Impacts of the Tibetan Plateau snow anomaly in winter and spring on precipitation in China in spring and summer. *Arid Meteorology* (in Chinese), 2003, **31** (3): 1~7

[5] 吴统文, 钱正安. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析. 气象学报, 2000, **58** (5): 570~581

Wu Tongwen, Qian Zheng'an. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai-Xizang Plateau and summer rainfall of Eastern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (5): 570~581

[6] 李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较. 高原气候, 2003, **22** (6): 565~573
Li Xin, Cheng Guodong, Lu Ling. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (6): 565~573

[7] 冯学智, 柏延臣, 史正涛, 等. 北疆地区积雪深度的克里格内插估计. 冰川冻土, 2000, **22** (4): 358~361
Feng Xuezhi, Bo Yanchen, Shi Zhengtao, et al. Snow depth in North Xinjiang Region estimated by Kriging interpolation. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2000, **22** (4): 358~361

[8] 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题. 地理研究, 2004, **23** (4): 425~432
Zhu Huiyi, Liu Shulin, Jia Shaofeng. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements. *Geographical Research* (in Chinese), 2004, **23** (4): 425~432

[9] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素空间插值方法优化. 地理研究, 2004, **23** (3): 357~364
Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Ding Xiaoqiang, et al. Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources. *Geographical Research* (in Chinese), 2004, **23** (3): 357~364

[10] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较. 地球科学进展, 2000, **15** (3): 260~265
LI Xin, Cheng Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15** (3): 260~265

[11] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002. 105~125
Xu Jianhua. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002. 105~125

[12] 周国法, 徐汝梅. 生物地理统计学——生物种群时空分析的方法及其应用. 北京: 科学出版社, 1998. 42~45
Zhou Guofa, Xu Rumei. *Biogeostatistics—Methodology and Application of Spatial Analysis of Biology Species*. Beijing: Science Press, 1998. 42~45

[13] Collins F C. A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/collins_fred/collins.html.

[14] 柯长青, 李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征. 地理学报, 1998, **53** (3): 209~215

- Ke Changqing, Li Peiji. Spatial and temporal characteristics of snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1998, **53** (3): 209~215
- [15] 李培基. 高亚洲积雪分布. 冰川冻土, 1995, **17** (4): 291~298
- Li Peiji. Distribution of snow cover over the high Asia. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1995, **17** (4): 291~298
- [16] 崔彩霞, 杨青, 王胜利. 1960~2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析. 冰川冻土, 2005, **27** (4): 486~490
- Cui Caixia, Yang Qing, Wang Shengli. Comparison analysis of the long-term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang Region from 1960 to 2003. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2005, **27** (4): 486~490
- [17] 徐兴奎, 陈红, 周广庆. 青藏高原地表特征时空分布. 气候与环境研究, 2005, **10** (3): 409~420
- Xu Xingkui, Chen Hong, Zhou Guangqing. The spatio-temporal distribution of land surface features in the Tibetan Plateau. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 409~410
- [18] 刘玉洁, 郑照军, 王丽波. 我国西部地区冬季雪盖遥感和变化分析. 气候与环境研究, 2003, **8** (1): 114~123
- Liu Yujie, Zheng Zhaojun, Wang Libo. Remote sensing on snow cover and variation analyzing in West of China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (1): 114~123