

PRISM 模型在复杂地形月降雨空间插值中的可行性研究

蒋育昊¹, 刘鹏举¹, 夏智武², 许等平³, 刘长春¹

(1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091; 2. 湖南省湘潭县林业局, 湖南 湘潭 411228; 3. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘 要:降雨是重要的林业气象数据,如何在复杂地形环境下获取高精度的降雨数据对于研究森林生态与环境具有重要意义。以北京西北山区为例,利用 PRISM 模型、DEM 和山地自动气象站点数据等,综合考虑海拔、坡向、距离等多种影响因子,对降雨量进行了空间插值研究,并使用 GDAL 输出含有地理信息的降雨分布图。为比较 PRISM 插值结果,对所用气象站点数据进行交叉验证,交叉验证得到的 MAE 为 1.68 mm, RMSE 为 2.26 mm,同时高海拔地区插值精度较低海拔地区有所降低。为进一步体现 PRISM 方法的优越性,将其与常用的 IDW 插值、Kriging 插值、Spline 插值和 Trend 插值结果进行了比较。结果表明,基本所有的插值方法得到的结果都表现为降雨随高程的增加而增加,PRISM 的结果最为详细,IDW 和 Kriging 插值结果次之,Spline 相对较差,甚至出现负值,Trend 结果一般,缺少细节反映。结合七个验证站点数据对比,更加说明了使用 PRISM 模型得到的插值结果更加接近实测数据。这些结果都说明,在复杂地形条件下,PRISM 比其他插值方法更能精确地表达降雨空间分布。

关键词:PRISM 模型; 复杂地形; DEM; 降雨; 空间插值

中图分类号:P457.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0057-05

Study on the Feasibility of PRISM in Spatial Interpolation of Rainfall in Complex Terrain

JIANG Yuhao¹, LIU Pengju¹, XIA Zhiwu¹, XU Dengping³, LIU Changchun¹

(1. Research Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Forestry Bureau of Xiangtan Country, Xiangtan, Hu'nan 411228, China; 3. Academy of Forest Inventory and Planning, SFA, Beijing 100714, China)

Abstract: Rainfall is one of the important forestry meteorological data, and how to obtain high-precision rainfall data in complex terrain environment is of great significance for the study of forest ecology and environment. Considering the impact brought by elevation, slope and distance factors, a new meteorology based on PRISM was supposed to interpolate the spatial distribution of rainfall with DEM and data of automatic weather stations in northwest of Beijing, and output the results in GDAL. We used the method of cross-validation to validate the precision of results, and the MAE is 1.68 mm, RMSE is 2.26 mm, while the interpolation precision of high altitude is less than that of the low altitude. To further demonstrate the superiority of PRISM, the results were also compared with common methods, such as IDW, Kriging, Spline and Trend. The results showed most of the results obtained by interpolation methods had shown that rainfall increased with elevation, and the results of PRISM were the most detailed, while the results of IDW and Kriging come next, but Spline was poor, or even had negative values. As for trend, the results were ordinary, and lacked of the detail. Compared with data of seven verification stations, the conclusion further illustrated that the results of PRISM were closer to the field measured data. These results showed that PRISM was more accurately than other interpolation methods to express the spatial distribution of rainfall under the complex terrain conditions.

Keywords: PRISM; complex terrain; DEM; rainfall; spatial interpolation

降雨是云层中液态的水降落到地面的过程,也是自然界常见的一种天气现象^[1]。降雨的空间分布受

到众多要素的影响,其中海拔是非常重要的影响要素。众多前人的研究表明,随着海拔高度的增加,降

雨量也会增加。陆忠艳等利用重庆地区常规观测资料,分析影响降水空间分布的主要因子,结果表明海拔高度与降水量有良好的相关关系^[2]。陈祥义等对三峡库区龙河流域进行了降水空间分布研究,同样得到了降水量与海拔之间具有密切关系的结论^[3]。降雨数据是进行水文、气象、植被覆盖等研究的重要基础资料^[4],所以高精度的降雨数据是现在人们所迫切需要的。但是由于观测站点的空间分布并不均匀,并且大多布设在地势较为平缓的地区,因而采用有限的观测站点数据来对整个区域进行降雨空间整体分布研究就显得意义重大。

常见的空间插值方法有反距离加权法(Inversed Distance Weight, IDW)、样条函数法(Spline)、趋势面法(Trend)、普通克里金法(Ordinary Kriging),泛克里金(Universal Kriging)、协同克里金法 Co-Kriging)等。储少林等以甘肃省为例,利用反距离加权法、样条函数法和普通克里格法等方法进行空间降水插值研究,结果表明 3 种方法的结果都基本上反映了甘肃降水大体空间分布规律,而普通克里格法的插值效果最好,反距离加权法较差^[5]。宋丽琼等以深圳市为例进行日降水量的距离权重倒数法、局部多项式法、普通克里金法和考虑海拔的协克里金法等空间插值方法与应用对比分析,研究表明,克里金法优于距离权重倒数法和局部多项式法。与普通克里金法相比,考虑海拔的协克里金法对插值精度没有明显提高^[6]。庄立伟等利用东北日降水数据进行空间插值方法比较,认为 IDW 插值方法优于克里金插值法^[7]。封志明等运用反距离加权法(IDW)和梯度距离反比法(GIDW)对 1961—2000 年甘肃省及其周围 85 个气象站点的多年平均温度与降雨量进行了内插,结果表明 GIDW 明显优于 IDW^[8]。以上多为大尺度降雨的空间插值研究,忽略了研究区下垫面的地形影响,而对于地形较为复杂的山区,高程、坡向、坡度等地形要素无法忽略,而这些地形要素对于降雨会产生很大的影响。PRISM 插值方法将高程作为插值计算的主要影响因子,综合考虑了距离、坡向、坡度、垂直分层、距离海岸线远近等因子对气象要素的影响。在地形复杂的区域进行气象要素插值时,PRISM 在插值精度与灵活性上的优越性都相当明显^[9-10]。朱华忠等利用 PRISM 模型对全国进行月温度和降水的插值研究,结果表明 PRISM 模型较好地模拟了我国温度和降水的空间分布及季节变化^[11]。赵登忠等在黑河流域使用了 PRISM 模型模拟降水和气温变化,并与传统插值方法进行对比,效果显著^[12]。韩庆红等利用 PRISM 在松花江流域对该流域降水分布情况进

行了插值计算,同时使用交叉检验方法检测了插值精度,得到了令人满意的结果^[13]。夏智武等将 PRISM 模型应用于北京西北山区的山地小环境日气温空间插值研究中,通过交叉检验和与实测值对比,验证了 PRISM 的可靠性^[14]。蒋育昊等利用 PRISM 模型得到了山地湿度插值的良好结果^[15]。

目前 PRISM 模型主要在大尺度上进行应用,而对于山地环境的降雨插值研究还刚起步。本文在降雨和高程的较强相关性关系的基础上,以北京西北山区为例,实现 PRISM 空间内插方法对山地小环境降雨空间插值的可能。

1 PRISM 空间插值理论基础

PRISM(Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model)空间插值算法是由美国气象学家 Christopher Daly 提出的一种基于地理空间特征和回归统计方法生成气候图的插值模型。PRISM 模型的前决条件是在研究区内,某种气象要素的分布受海拔的影响是最主要的^[16]。常用的 Kriging, Spline, IDW 和 Trend 等其他插值方法通常是在整个研究区域内进行插值计算,忽略了地形,尤其是高程因素对于插值结果的影响,PRISM 插值方法是以研究区 DEM 为基础,使用开窗技术,在一个窗口内,利用已知站点的信息,结合地形信息建立局部递减率,进行插值计算。同时,降雨量的大小会受到坡向、高程等多种因素的影响,在进行插值计算时,不同位置的已知降雨量对于待插值点的影响是不一样的,一般来说位于同一坡面、同一高程,并且距离较近的点对于待插值点的影响较大。所以,在一个插值窗口内进行插值计算时,不同位置的已知站点的不同地理信息对于待插值点都会有不同的权重影响,在运用 PRISM 时,建立各项指标的综合权重,将其带入回归函数中,得到加权最小二乘回归方程,提高精度。

1.1 加权最小二乘回归方程

PRISM 模型认为高程是影响气象要素的主要因子,同时由于降雨量的大小会受到坡向、高程等多种因素的影响,所以在结合站点数据建立最小二乘回归方程时,要多方考虑地形因素的影响,即建立加权最小二乘回归方程。

$$Y = aX + b \quad (1)$$

式中:Y 表示预测降雨量值;X 是 DEM 栅格点上的高程值;a, b 为回归方程系数^[17]。

$$\text{式中: } a = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})^2}, \quad b = \bar{y} - a\bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

式中: n 为站点数目; x_i 是站点海拔; y_i 是站点降雨量; \bar{x} 为平均海拔; \bar{y} 为平均降雨量; w_i 为综合权重。

1.2 综合权重

在加权最小二乘回归方程中, w_i 是每个站点的综合权重, 主要考虑了站点的距离、高程、站点聚集度、垂直分层、地形坡向、距离海岸线的远近和有效地形等因子。公式如下:

$$W = f(W_d, W_z, W_c, W_l, W_f, W_p, W_e) \quad (3)$$

式中: $W_d, W_z, W_c, W_l, W_f, W_p, W_e$ 分别是距离、高程、站点聚集度、垂直分层、地形坡向、距离海岸线的远近和有效地形权重, W 是综合权重。由于本文研究区为北京西北山区, 距离海岸线的远近和垂直分层等因子暂不考虑, 并且由于传统插值方法一般均基于距离进行计算, 而高程与降雨有较为明显的线性关系, 且降雨一般发生在迎风坡, 说明坡向对于降雨同样有很大影响, 基于以上原因, 本文在进行 PRISM 模型插值计算时, 选择距离、高程和坡向作为模型输入因子。

1.2.1 距离权重(W_d) PRISM 模型认为, 加权站点在回归函数中的影响力是随着该站点到目标栅格距离的增加而降低的。即距离越近影响力越大, 距离越远, 影响力越小, 同时, 距离权重也是待插值点对于周边环境影响力的一个基本表征特征, 核心思想类似于反距离权重函数。距离权重(W_d)的公式为:

$$W_d = \begin{cases} 1 & d=0 \\ \frac{1}{d^a} & d>0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: d 为水平方向上站点与栅格的距离大小; a 为距离权重指数, 一般为取值为 2。

1.2.2 坡向权重(W_f) 越相近的坡向, 所赋权重也就越高。在 PRISM 的窗口算法过程中, 站点数据密度和当地地形的复杂度决定了合适的窗口单元。在一个窗口内检索一定数量的位于同一连续坡面的站点。认定一个站点与待插值的目标站点位于同一坡面需要满足两个条件: 站点所在的栅格在同一方位内, 与目标站点栅格位于同一地形方向; 站点要同待插值的目标站点一样, 即位于同一相似方位或者坡面的栅格群中。坡向权重(W_f)的公式为:

$$W_f = \begin{cases} 1 & \Delta f \leq 0 \text{ 和 } B=0 \\ \frac{1}{(\Delta f+B)^c} & \Delta f > 0 \text{ 和 } B>0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δf 为站点和目标站点方位差值的绝对值(最大

差值为四个方位点, 即 180°); B 为与待插值目标栅格点坡向信息明显不一致的带有方向性的干扰障碍栅格的数量; C 为坡向权重指数, 一般取值为 1。

1.2.3 高程权重(W_z) 高程对气象是非常重要的影响因子之一, 高程权重量化了对于目标栅格单元具有特定含义的垂直距离, 从而适应在数据高度范围内的, 由于坡度变化而变化的气候资料。站点在回归函数中的影响力是随着距离目标栅格单元的增加而减少。PRISM 规定, 在插值时, 插值站点在垂直距离上, 和目标站点相差无几的时候, 不参与回归函数, 只有当大于 100 m 以上才参与回归函数。这使得数据点被限制在一个当地的高程范围内, 高程差的最小值取值从 100~300 m 不等。高程差最大值取值从 500~2 500 m 不等。高程权重(W_z)的公式为:

$$W_z = \begin{cases} \frac{1}{\Delta Z_m^b} & \Delta Z \leq \Delta Z_m \\ \frac{1}{\Delta Z^b} & \Delta Z_m < \Delta Z < \Delta Z_x \\ 0 & \Delta Z \geq \Delta Z_x \end{cases} \quad (6)$$

式中: Δz 为站点与目标栅格单元的绝对高程差; b 为高程加权指数, 一般取值为 1; Δz_m 为最小高程差; Δz_x 为最大高程差。

2 数据与研究区概况

本文以北京西部山区为主要研究区域, 该区域面积 5 645.98 km², 位于东经 $115^\circ 59' - 116^\circ 06'$ 和北纬 $39^\circ 54' - 39^\circ 57'$ 。该区域夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋短促, 高程范围在 29~2 176 m, 最高点为东灵山。本研究采用 1:25 万 DEM 数据, 其空间分辨率为 100 m × 100 m, 气象数据由国家气象科研数据共享平台提供, 为 2012 年北京地区 31 个数据完好的气象站点数据。选取降雨多具备大范围持续性的特点的四月份降雨数值进行插值研究。站点分布见图 1, 图中圆形站点为插值站点, 正方形为验证站点。

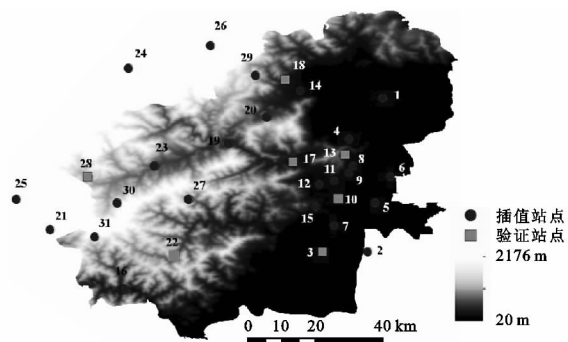


图 1 研究区与站点分布

3 结果与分析

本文在 PRISM 插值方法的基础上,选取研究区内 31 个有降雨气象资料的站点,利用交叉验证(Cross-validation)进行插值结果验证,同时预留 7 个气象站点作为验证站点,不参与插值计算,利用其他站点分别进行 PRISM,IDW,Kriging,Spline,Trend 插值结果计算,提取验证站点结果,进行比较验证。本文用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来评价插值结果的精度。均方根误差描述误差的离散程度,均方根误差越大,其内插结果变化越大,插值结果越不稳定。

3.1 交叉验证

对 31 个气象站点的降雨数据进行 PRISM 插值计算,将其结果进行交叉验证,并得到 MAE 和 RMSE,计算结果见表 1,绝对误差变化趋势见图 2。

表 1 分组交叉验证结果

序号	站号	海拔/ m	实际降雨 量/mm	预测降雨 量/mm	绝对 误差/mm
1	651409	44.00	26.00	24.18	1.82
2	651270	46.10	25.10	24.44	0.66
3	651314	46.00	25.00	24.43	0.57
4	651069	52.00	25.00	24.98	0.02
5	651053	54.00	27.00	26.03	0.97
6	651037	55.00	25.00	24.48	0.52
7	651074	58.00	22.00	23.73	1.73
8	651068	62.00	23.00	24.54	1.54
9	54513	65.60	22.00	23.05	1.05
10	651022	89.00	21.00	22.44	1.44
11	651036	91.00	23.00	24.30	1.30
12	54505	92.70	23.00	24.48	1.48
13	651032	105.00	27.00	28.01	1.01
14	651422	114.00	23.00	24.95	1.95
15	651066	119.00	33.00	31.83	1.17
16	651318	153.00	28.00	28.79	0.79
17	651361	169.00	30.00	28.90	1.10
18	651404	215.00	28.00	30.21	2.21
19	651358	252.00	40.00	42.13	2.13
20	651410	326.00	26.00	28.50	2.50
21	661862	370.60	30.00	32.25	2.25
22	54597	407.70	39.00	37.34	1.66
23	54501	440.30	39.00	36.82	2.18
24	651453	498.00	31.00	33.09	2.09
25	663076	590.00	49.00	47.34	1.66
26	663095	605.00	35.00	32.54	2.46
27	651320	621.00	45.00	47.84	2.84
28	651359	691.00	38.00	40.56	2.56
29	651417	872.00	36.00	38.93	2.93
30	651360	995.00	70.00	73.51	3.51
31	651312	1163.00	55.00	52.96	2.04

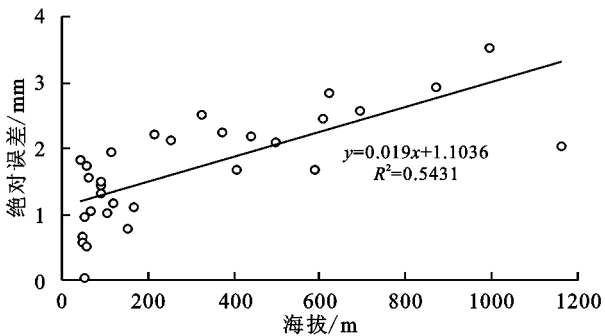


图 2 绝对误差变化趋势

从计算结果上来看,基于 PRISM 模型得到的插值结果的 MAE 为 1.68 mm,RMSE 为 2.26 mm,绝对误差最大是 3.51 mm,最小的是 0.02 mm。从绝对误差的变化趋势上看,所有站点的验证精度并不一致,大致规律是海拔较低的站点,数据精度相对较高,而海拔较高的站点,数据精度则会相对较低,主要原因在于在该研究区内布设的站点大多分布在中低海拔地区,且分布较为均匀,而高海拔地区可以利用的站点相对较少,站点之间的距离也相对较大,所以误差会有所增加。整体来看,PRISM 插值结果合理,误差变化幅度较小。

3.2 模型比较验证

为了进一步体现 PRISM 在复杂地形下进行降雨数据插值的优越性,我们利用 PRISM 输出研究区整体降雨场的图,同时利用传统的 IDW,Kriging,Spline 和 Trend 等种插值方法也进行了同样的降雨插值计算,输出降雨场,得到的结果附图 2。由图可知,基本所有的插值方法得到的结果都表现为降雨随高程的增加而增加,相比之下,通过 PRISM 模型得到的插值结果最为完整,并可以反映降雨随地形变化的细节,IDW 和 Kriging 插值结果次之,Spline 相对较差,甚至出现负值,Trend 结果一般,缺少细节反映。

为使模型对比结果更加清楚了,我们在所有气象站点中,选取 7 个站点作为验证站点,其他站点作为输入站点,分别进行 PRISM,IDW,Kriging,Spline 和 Trend 插值计算,再提取出验证站点的降雨信息,与实际值进行精度比较。各验证站点属性信息见表 2。

将 5 种插值方法得到的结果与验证站点数据进行比较,比较结果见图 3,结果表明五种插值方法得到的结果误差随着海拔的增加呈现增加的趋势,在所有插值方法中,使用 PRISM 模型得到的插值结果更加接近实测数据。不同插值方法得到的误差统计结果表明,使用 PRISM 模型得到的降雨插值结果的精度要高于其他空间插值方法(表 3)。因此,在复杂地形条件下,PRISM 模型可以更精确地显示降雨的空间分布情况。

表 2 验证站点属性信息

验证站点号	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	海拔/m	降雨量/mm
651314	116.13	39.74	46	25
651022	116.17	39.88	89	21
651032	116.19	40.00	105	27
651361	116.05	39.98	169	30
651404	116.03	40.20	215	28
54597	115.73	39.73.	407.7	39
651359	115.50	39.94	691	38

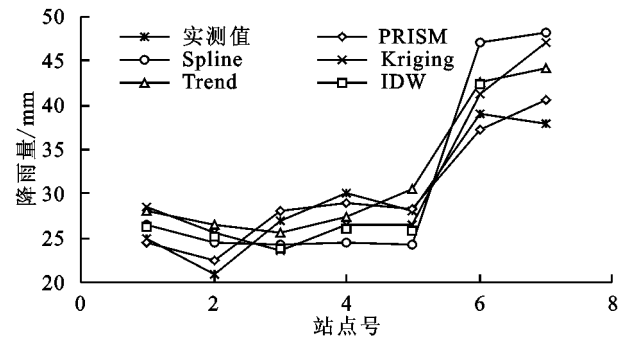


图 3 内插结果与验证站点数据的比较

表 3 不同方法降雨插值误差统计结果

插值方法	MAE	RMSE
IDW	4.40	5.61
Kriging	4.03	4.62
Spline	5.03	5.82
Trend	3.52	3.88
PRISM	1.22	1.41

4 讨论

PRISM 是一种基于空间特征的回归统计方法,在使用时要考虑以下几个方面,首先高程对于气象要素的影响是主要的,其次复杂的山地环境会影响气象要素的地形空间尺度和分布格局。这些都是我们在使用 PRISM 模型之前要考虑的一些问题,同时在接下来的工作中,还要进一步讨论以下几点问题:(1) 时间尺度。本文主要针对月降雨进行插值计算,日降雨和年降雨均未考虑。如果增加对日降雨的计算,则需要引入目标栅格点降雨发生概率的计算,而年降雨则需要参考季节因素的影响。这是下一步研究的发展方向。(2) 因子选择。由于降雨是一个多因子综合作用的过程,降雨的空间分布也较为复杂,本文所考虑的权重因子很有限,在以后的研究中,应使用更多的权重因子进行计算,反映更加细节的影响关系。(3) 数据密度。北京西北山区地形复杂,但是气象站点,尤其是高海拔地区的气象站点数量较少,即便将周边地区的站点也纳入研究范围,符合条件的较好插

值站点为 31 个,其中可作为验证站点也只有 7 个,这在一定程度上对于数据精度产生了影响。因此,随着北京乃至全国气象监测体系的不断完善和地理信息技术的逐渐提高,空间气象插值精细化研究有待深入。

5 结论

本文利用 PRISM 空间插值模型,结合 2012 年 4 月份降雨数据,基于降雨数据与高程的较强相关关系,对地形较为复杂的北京西北山区进行降雨空间内插计算和分析,并对插值数据进行交叉验证与模型比较验证,结果表明在所有参与插值计算的 31 个气象站点中,最大插值误差为 3.51 mm,最小插值误差为 0.02 mm,交叉验证结果的 MAE 为 1.68 mm, RMSE 为 2.26 mm,可以更好地反映出北京西北山区的降雨空间分布,同时将 PRISM 模型与 IDW, Kriging, Spline 和 Trend 等传统插值方法相比,PRISM 模型得到的插值结果最为完整,可以反降雨随地形变化的细节。另外,本文也选取了位于不同海拔位置的七个验证站点,进行不同插值方法的精度比较,数据结果显示,在全部七个验证站点中,利用 PRISM 模型的到的插值结果的 MAE 和 RMSE 均最小,分别为 1.22 mm 和 1.41 mm。整体来看,与其他方法相比,本文提出的 PRISM 空间插值放的得到的结果精度高,误差变化范围较小,表现相对稳定,为获得高分辨率降雨数据提供了可能性,同时也为森林水文研究与流域综合治理提供良好的数据支撑。

参考文献:

[1] 伍光和王乃昂,胡双熙,等. 自然地理学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2007.

[2] 陆忠艳. 起伏地形下重庆降水精细的空间分布[D]. 南京:南京信息工程大学,2004.

[3] 陈祥义. 三峡库区龙河流域非点源污染模拟研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.

[4] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京:科学出版社,1983.

[5] 储少林,周兆叶,袁雷,等. 降水空间插值方法应用研究:以甘肃省为例[J]. 草业科学,2008,25(6):19-23.

[6] 宋丽琼,田原,邬伦,等. 日降水量的空间插值方法与应用对比分析:以深圳市为例[J]. 地球信息科学,2008,10(5):566-572.

[7] 庄立伟,王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究[J]. 应用气象学报,2003,14(5):605-615.

[8] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等. 气象要素空间插值方法优化[J]. 地理研究,2004,23(3):357-364.

[9] Daly C, Gibson W P, Taylor G H, et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate[J]. Climate Research, 2002,22(2):99-113.

- Geographical Sciences, 2010, 20(2): 231-247.
- [5] Hou S, Wang P, Guo Y, et al. Factors driving riverbed scouring and sedimentation in the Bayangaole to Toudaoguai reaches of the Upper Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9): 1305-1320.
- [6] 王平, 侯素珍, 张原锋, 等. 黄河上游孔兑高含沙洪水特点与冲淤特性[J]. 泥沙研究, 2013, (1): 67-73.
- [7] 刘韬, 张士峰, 刘苏峡. 十大孔兑暴雨洪水产输沙关系初探: 以西柳沟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(3): 18-21.
- [8] 李璇. 西柳沟流域水沙流失特点及治理措施探讨[J]. 内蒙古水利, 2013(1): 89-90.
- [9] 刘通, 黄河清, 邵明安, 等. 气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 17-22.
- [10] 冉大川, 张栋, 焦鹏, 等. 西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 143-149.
- [11] 赵昕, 汪岗, 韩学士. 内蒙古十大孔兑水土流失危害及治理对策[J]. 中国水土保持, 2001(3): 4-6.
- [12] 曾茂林, 朱小勇, 康玲玲, 等. 水土流失区淤地坝的拦泥减蚀作用及发展前景[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 127-133.
- [13] 刘晓林, 杨胜天, 周旭, 等. 1980 年以来黄河内蒙古段十大孔兑流域土地利用变化时空特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016(1): 30-36.
- [14] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域水沙变化水文分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(2): 9-11.
- [15] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报, 1983, 3(4): 7-13.
- [16] Liu Xiaoyan, Yang Shengtian, Dang Suzhen, et al. Response of sediment yield to vegetation restoration at a largespatial scale in the Loess Plateau[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(8): 1482-1489.
- [17] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕. 黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性, 干旱区研究, 2015, 32(4): 698-709.
- [18] 刘晓燕, 刘斌, 杨胜天. 黄土高原沟壑区产沙驱动力及减沙潜力分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(5): 1-3.
- [19] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1239-1300.
- [20] 高云飞, 郭玉涛, 刘晓燕, 等. 黄河潼关以上现状淤地坝拦沙作用研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 37-99.
- [21] 赵广举, 穆兴民, 温仲明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1-8.

(上接第 61 页)

- [10] Taylor G H, Daly C. Using PRISM climate grids and GIS for extreme precipitation mapping[C]// Proceedings of the 14th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Seattle, WA, USA, 2004.
- [11] 朱华忠, 罗天祥, Daly C. 中国高分辨率温度和降水模拟数据的验证[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 351-359.
- [12] 赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 205-211.
- [13] 韩庆红, 陈渭民, 王普才, 等. PRISM 在松花江流域降水分布中的应用研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(1): 56-61.
- [14] 夏智武, 刘鹏举, 陈增威, 等. 山地环境日气温 PRISM 空间插值研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 83-90.
- [15] 蒋育昊, 刘鹏举, 夏智武, 等. 基于 PRISM 的山地环境大气湿度的空间插值[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2016, 45(6): 692-699.
- [16] Daly C. Variable influence of terrain on precipitation patterns: Delineation and use of effective terrain height in PRISM[R]. World Wide Web document. <http://www.ocs.orst.edu/prism/effter.pdf>, 2002.
- [17] 徐成东. 基于线性加权回归模型的降水量空间插值方法研究[D]. 河南开封: 河南大学, 2008.

(上接第 65 页)

- [14] 侯红波. 浏阳大围山土壤研究初探[J]. 湖南林业科技, 2004, 31(3): 27-28.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [17] 卢喜平, 史东梅, 蒋光毅, 等. 两种果草模式根系提高土壤抗蚀性的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 64-67.
- [18] 谢红霞, 陈琼, 李锦龙, 等. 长沙市东郊不同母质发育耕型红壤的可蚀性因子 K 值估算[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 133-135.
- [19] 张振国, 黄建成, 焦菊英, 等. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 28-31.