

中国北方风蚀水蚀侵蚀动力时空分布特征

贾莲莲¹, 高海东², 樊冰¹, 李占斌^{2,3}

(1. 黄河水利委员会 黄河上中游管理局, 西安 710021; 2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048; 3. 中科院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以中国北方15省为研究对象,收集了研究区内长时间序列气象数据349站,计算了降雨侵蚀力和风蚀气候因子指数,采用半方差函数和基尼系数等指标,系统分析了风蚀动力和水蚀动力的时空分布格局。结果表明:(1)中国北方降雨侵蚀力平均值为 $1\ 652.90\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,风蚀气候因子指数平均值为70.12,降雨侵蚀力在空间分布上呈中等程度变异,而风蚀气候因子指数为强变异。(2)降雨侵蚀力具有强烈的空间相关性,而风蚀气候因子指数具有中等的空间相关性。风蚀气候因子指数总体表现北方高南方低,中部高,东西较低,而降雨侵蚀力的空间分布从东南向西北呈递减趋势。(3)风蚀气候因子指数和降雨侵蚀力具有明显的非同步性,风蚀气候因子指数的年内分布较为均匀,而降雨侵蚀力的年内分布极不均匀。研究结果可为我国北方风蚀水蚀综合治理提供一定参考。

关键词:降雨侵蚀力;风蚀气候因子指数;时空特征

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0019-05

Spatiotemporal Characteristics of Water-Wind Erosion Dynamics Over Northern China

JIA Lianlian¹, GAO Haidong², FAN Bing¹, LI Zhanbin^{2,3}

(1. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 15 provinces in northern China were taken as the research samples, first of all, 349 stations of the meteorological data of long time series in the study area were collected, then the rainfall erosivity and wind erosion climatic erosivity were calculated, meanwhile, a systematic analysis of the temporal and spatial distribution pattern of wind and water erosion dynamics were carried out by the semivariogram and Gini coefficient as well as other indexes. The results showed that: (1) the average value of the rainfall erosivity in North China was $1\ 652.90\ \text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ and the wind erosion climatic erosivity average reached 70.12; the rainfall erosivity distribution in space had a moderate variability, while wind erosion climatic erosivity presented a strong variation; (2) a strong spatial correlation appeared in the rainfall erosivity, while a moderate spatial correlation was found in the wind erosion climatic erosivity; the latter showed the overall performance where high in the north and the central, low in other region, while the spatial distribution of rainfall erosivity from the southeast to the northwest showed a decreasing trend; (3) the wind erosion climatic erosivity and the rainfall erosivity were obviously non synchronous. The distribution of the former was more uniform while extremely uneven for the latter. The research results could provide some references for the comprehensive management of the wind-water erosion crisscross region in North China.

Keywords: rainfall erosivity; wind erosion climatic factor; spatial-temporal characteristics

土壤侵蚀是指土壤和成土母质在外营力作用下的分离、破坏和移动^[1],是人类生存和发展面临的全球性环境问题,严重制约着社会经济的可持续发展^[2]。中国北方地区由于气候干旱和不合理的人类活动,导致生态环境恶化,土地沙化严重。在中国北方,风蚀和水蚀是两种主要的土壤侵蚀类型,风蚀和水蚀经常同时或者交替发生,形成了风水复合侵蚀^[3]。强烈的风水复合侵蚀是脆弱环境形成的根源之一,也是脆弱环境的重要体现^[4]。

关于风水复合侵蚀,目前主要集中在风水复合侵蚀区的划分、驱动因素、复合侵蚀机理以及生态恢复对策研究^[5]。而侵蚀能量及外力的研究,是风水复合侵蚀机理研究的重要内容之一。张平等^[6]研究得出六道沟风水复合侵蚀区 4—5 月和 11 月是风蚀能量的高峰时期,而在 7—8 月,形成水力侵蚀的高峰。高学田等^[7]研究表明,在风水交错带,在降雨侵蚀能量的基础上,由于风蚀能量的迭加,加之地形附加侵蚀能量也较高,使风蚀水蚀交错带成为黄土高原的高侵蚀能量环境和潜在侵蚀强度较大的地区。张庆印等^[8]在室内模拟的结果表明,在一定的水蚀沟宽度与密度范围内,风蚀量随着宽度与密度的增加而增加,并且两者与风蚀量都呈线性关系。杨岩岩等^[9]分析了陕西省靖边县榆林风沙科学野外试验站的沙漠—黄土过渡带风水复合侵蚀营力的特征,结果表明,研究区年内降雨量 ≥ 12 mm 的降雨事件主要分布在 5—9 月,月平均降雨侵蚀力 8 月最大,起沙风主要集中在 3—6 月,且起沙风变率较大,属于中等风能环境。可以看出,在整个北方宏观尺度上,系统研究风蚀水蚀侵蚀动力时空分布特征的报道较少。

本文以北方 349 个气象站为对象,系统分析侵蚀性降雨天数、多年平均侵蚀性降雨量、侵蚀性降雨量比例、降雨侵蚀力、多年平均年启动风速天数以及风蚀气候因子指数的统计特征,并以降雨侵蚀力和风蚀气候因子指数为研究重点,分析风蚀和水蚀动力的时空格局特征,为这一地区的风蚀和水蚀的综合治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

中国北方 15 省地处北纬 $31^{\circ}23'$ — $53^{\circ}33'$,东经 $73^{\circ}27'$ — $135^{\circ}05'$,总面积 564 万 km^2 ,占中国陆地总面积的 59%,包括北京、天津、黑龙江、辽宁、吉林、河北、河南、山东、内蒙古、山西、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆 15 个省(自治区、直辖市)。是我国生态环境较为脆弱地区,近年来随着国家生态治理工程的相继实施,植被覆盖度明显提高,逐步成为我国北方生态屏障。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),共收集研究区气象站 349 站(图 1),时间序列最长为 63 a,最短为 10 a,其中大于 30 a 的站点为 284 站,比例为 81%。主要指标包括日降雨量、平均气压、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速、极大风速等。



图 1 研究区气象站点分布

1.3 研究方法

根据 RUSLE 手册及国内相关研究^[10],侵蚀性降雨标准为降雨量 ≥ 12 mm/d,根据日降雨数据,统计获得多年平均侵蚀性降雨天数以及多年平均侵蚀性降雨量,并计算多年平均侵蚀性降雨量占多年平均降雨量的比值。启动风速一般定义为 ≥ 5 m/s,本研究根据极大风速分析启动风速年内分布特征,统计多年平均年启动风速天数。降雨侵蚀力采用由月降雨量计算降雨侵蚀力的经验公式^[11]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (1.735 \times 10^{1.5 \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8188}) \quad (1)$$

式中: P 和 P_i 分别为年和月平均降雨量(mm)。

气候条件对风蚀的影响不仅仅表现在风力作用上,而是风速、降水和温度等因子综合作用的结果。Chepil 等^[12]认为这些气候因子决定着年土壤风蚀水平,提出了风蚀气候因子指数,用于风蚀模型(WEQ)计算中。之后,联合国粮农组织(FAO)^[13]将 Chepil 公式修改为:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} \{u_i^3 [(ETP_i - P_i)/ETP_i] d_i\} \quad (2)$$

式中: u_i 为 2 m 处的月均风速;ETP_i为月潜在蒸发量; P_i 为月降水量; d_i 为月总天数。

月潜在蒸发量(ETP₀)采用 FAO Penman-Monteith 公式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

式中:ET₀为可能蒸散量(mm/d); R_n 为地表净辐射[MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)]; G 为土壤热通量[MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)]; T 为 2 m 处日均气温($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2 m 处风速(m/s); e_s 为饱和

水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); γ 为干湿表常数(kPa/°C)。

样本的描述性分析采用 SPSS 16.0 软件进行,统计特征值包括最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数、偏度、峰度等。半方差函数采用 GS+7.0 进行计算,空间分布图采用 ArcGIS 10.1 制作。

半方差函数可用来分析气象要素空间变异的随机性和结构性,它是地统计学特有的工具和分析基础。半方差函数是研究空间变异的关键函数,表达式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (4)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; $z(x_i) - z(x_i+h)$ 为间隔 h 的 2 个观测点的实测值; $N(h)$ 为以 h 为步长的所有观测点的成对数目。半方差函数图通常是对 h 作图得到,通常半方差函数的数值会随着样点距离的增加而增加,并在一定的变程内增加到一个基本稳定的常数,即基台值。根据决定系数 R^2 和残差 RSS 对半方差函数进行拟合得到合理的理论模型。

采用变异系数(CV)和 GINI 系数(G)反映降雨侵蚀力和风蚀气候因子指数的年内变异情况,变异系数的计算公式为:

$$CV = (SD/\text{mean}) \times 100\% \quad (5)$$

式中:SD 为标准差;mean 为平均值。根据 Nielsen

的划分标准,CV 值 $\leq 10\%$ 时为弱变异, $10\% \sim 100\%$ 为中等程度变异, $\geq 100\%$ 时为强变异。

基尼系数是用来描述均衡程度的一种客观指标,近年来在水文学和气候学等领域被广泛采用^[14-15],用于描述环境变量的均匀性程度,计算公式如下:

$$G = 1 - \frac{1}{n} (2 \sum_{i=1}^{n-1} W_i + 1) \quad (6)$$

式中: W_i 表示将环境变量按大小排序,第 i 组的累计百分比; G 为基尼系数,在 $0 \sim 1$ 变化,当基尼系数为 0 时,表示绝对平均,当基尼系数为 1 时,绝对不平均。

2 结果与分析

2.1 风蚀水蚀侵蚀动力的描述性统计分析

中国北方侵蚀性降雨天数的平均值为 10.39 d,多年平均侵蚀性降雨量为 269.01 mm,占多年平均降雨总量的 52%,降雨侵蚀力最小值为 $4 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,最大值为 $6951 \text{ (MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均值为 $1652.90 \text{ (MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。多年平均年启动风速天数为 226.29 d,风蚀气候因子指数平均值为 70.12。侵蚀性降雨天数、多年平均侵蚀性降雨量、侵蚀性降雨量比例、降雨侵蚀力以及多年平均年启动风速天数均呈中等程度变异,而风蚀气候因子指数为强变异(表 1)。

表 1 风蚀水蚀侵蚀动力的描述性统计分析

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	CV/%
侵蚀性降雨天数/d	0.03	25.36	10.39	5.84	56.21
多年平均侵蚀性降雨量/mm	0.56	819.33	269.01	182.55	67.86
侵蚀性降雨量比例/%	0.02	0.80	0.52	0.19	36.54
降雨侵蚀力/($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	4.00	6951.00	1652.90	1158.50	70.09
多年平均年启动风速天数/d	43.80	364.80	226.29	67.09	29.65
风蚀气候因子指数	2.11	711.55	70.12	86.22	122.96

2.2 侵蚀动力因子的空间结构分析

在 GS+7.0 中对各侵蚀动力指标进行半方差函数拟合得到各自的半方差模型及其参数值(表 2)。拟合度(R^2)最高且残差平方和最小的模型作为最优模型。其中,多年平均侵蚀性降雨天数和降雨侵蚀力为球状模型,多年平均侵蚀性降雨量和多年平均侵蚀

性降雨量比例为高斯模型,多年平均年启动风速天数和风蚀气候因子指数为指数模型,其决定系数均大于 0.9,说明模型有很高的拟合精度,能够很好地反映研究区侵蚀动力的空间结构特征。变程反映区域化变量影响范围的大小,6 个指标变程的最小值为 1316 km,最大值为 3958 km。

表 2 各侵蚀动力因子的地统计学参数

项目	变换	模型	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)/\%$	变程/km	R^2
多年平均侵蚀性降雨天数	平方根	球状	0.01	2.12	0.47	3958	0.982
多年平均侵蚀性降雨量	平方根	高斯	2.50	36.00	6.94	1316	0.997
多年平均侵蚀性降雨量/多年平均降雨量	对数	高斯	0.02	0.22	9.09	1654	0.995
降雨侵蚀力	平方根	球状	4.80	220.50	2.18	1669	0.993
多年平均年启动风速天数	无	指数	1920.00	5302.00	36.21	2043	0.991
风蚀气候因子指数	对数	指数	0.38	1.39	27.34	1635	0.991

块金值表示由随机部分引起的空间异质性,较大的块金方差值表明较小尺度上的某种过程不容忽视;

基台值表示系统内总的变异。块金系数反映随机部分引起的空间异质性占总空间异质性的百分比,如果

该值高,说明随机部分引起的空间异质性程度起主要作用。块金系数代表了系统变量空间相关性的程度。如果比值 $<25\%$,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比例为 $25\% \sim 75\%$,表明系统具有中等的空间相关性; $>75\%$ 说明系统空间相关性很弱。

多年平均侵蚀性降雨天数、多年平均侵蚀性降雨量、多年平均侵蚀性降雨量占多年平均降雨总量的比重以及降雨侵蚀力等水力侵蚀动力指标的块金系数均小于 10% ,说明水力侵蚀动力具有强烈的空间相关性;而多年平均年启动风速天数和风蚀气候因子指数的块金系数均介于 $25\% \sim 75\%$,说明风蚀动力具有中等的空间相关性,由随机因素引起的空间变异占

有较大的比重。风蚀动力的空间相关性低于水蚀动力,原因在于风速等气象因子比降雨量更容易受到地形的影响,故其块金系数值较高。

2.3 风蚀水蚀侵蚀动力因子的空间分布特征

在 ArcGIS 软件的支持下,根据 GS+7.0 拟合得到的半方差模型对降雨侵蚀力和风蚀气候因子指数进行 Kriging 插值,绘制了各侵蚀动力因子的空间分布图(图 2)。从空间分布上看,风蚀气候因子指数总体表现北方高南方低(图 2A),中部高,东西较低,其中内蒙古北方中部是风蚀气候因子指数高值区域,而陕西和甘肃南部,风蚀气候因子指数较低。降雨侵蚀力(图 2B)的空间分布从东南向西北呈递减趋势。

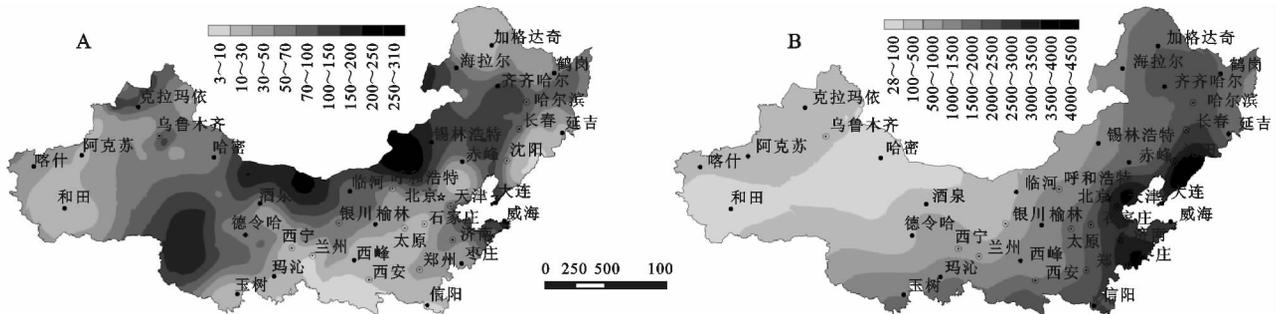


图 2 中国北方风蚀气候因子(A)和降雨侵蚀力(B)的空间分布

2.4 风蚀水蚀侵蚀动力因子的年内分布特征

对 349 个气象站进行统计分析,风蚀气候因子指数最大值出现的月份为 1 月 10 站(2.87%),2 月为 3 站(0.86%),3 月为 66 站(18.91%),4 月为 224 站(64.18%),5 月为 33 站(9.46%),6 月为 5 站(1.43%),12 月为 8 站(2.29%);降雨侵蚀力最大值月份 5 月为 8 站(2.29%),6 月为 7 站(2.01%),7 月为 271 站(77.65%),8 月为 61 站(17.48%),9 月为 2 站(0.57%)。我国北方地区,风蚀主要发生在 4 月、3 月、5 月,而水蚀主要发生在 7 月和 8 月,在时间上,具有明显的非同步性。风蚀先于水蚀发生,风蚀为水蚀提供了充分的物质来源,导致在风水蚀交错区河流的输沙模数增高。

整个中国北方地区,风蚀气候因子指数的年内变异系数平均值为 0.70,最小值为 0.19,最大值为 1.38,显示

出在年内尺度上,各月风蚀气候因子指数呈现出中等水平变异。降雨侵蚀力的年内变异系数平均值为 1.90,最小值为 0.55,最大值为 2.95,显示出强变异。

降雨侵蚀力基尼系数的最小值为 30.03%,最大值为 88.47%,平均值为 76.37%,标准差为 7.68%,而风蚀气候因子的最小值为 10.57%,最大值为 65.21%,平均值为 37.70%,标准差为 9.03%,基尼系数的计算结果也显示,降雨侵蚀力在年内分布极不均匀,而风蚀气候因子分布较为均匀。从空间分布上看(图 3),降雨侵蚀力基尼系数在环渤海一带年内分布极不均匀,而在陕西南部、甘肃南部以及新疆北部年内分布较均匀。而风蚀气候因子指数基尼系数在东北地区新疆北部以及陕西和甘肃南部分布略不均匀,其余地区分布较均匀。

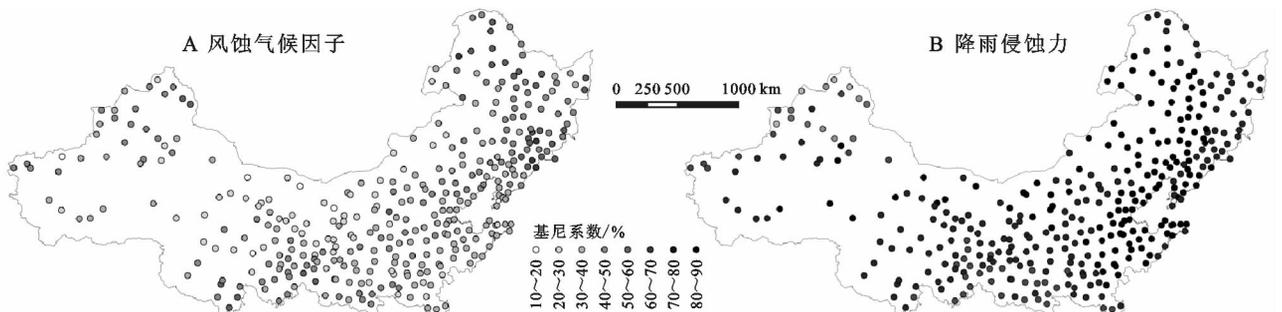


图 3 中国北方风蚀气候因子和降雨侵蚀力基尼系数空间分布

3 结论

从风蚀和水蚀动力的空间分布上看,毛乌素沙地南部、库布奇沙地东部、洪善达克沙地以及科尔沁沙地所处地带,其降雨侵蚀力大于1 000,而风蚀气候因子指数在50以上,这些地区植被覆盖度低,由于风蚀为水蚀提供了充足的物质基础,导致侵蚀模数较大,成为黄河、海河和辽河的泥沙主要来源地之一。因此,在这些地区,应该风水蚀兼治,降低侵蚀模数,减少入河泥沙。

(1) 中国北方多年平均侵蚀性降雨量为269.01 mm,占多年平均降雨总量的52%,降雨侵蚀力平均值为1 652.90 (MJ·mm)/(hm²·h·a)。风蚀气候因子指数平均值为70.12。降雨侵蚀力在空间分布上呈中等程度变异,而风蚀气候因子指数为强变异。

(2) 降雨侵蚀力具有强烈的空间相关性,而风蚀气候因子指数具有中等的空间相关性。风蚀气候因子指数总体表现为北方高南方低,中部高,东西较低,而降雨侵蚀力的空间分布从东南向西北呈递减趋势。

(3) 风蚀气候因子指数最大值出现最多的月份为4月(64.18%),降雨侵蚀力最大值出现最多的月份为7月,具有明显的非同步性。风蚀气候因子指数的年内分布较为均匀,而降雨侵蚀力的年内分布极不均匀。

参考文献:

- [1] 景可,陈永宗.我国土壤侵蚀与地理环境的关系[J].地理研究,1990,9(2):29-38.
- [2] 李锐.中国水土流失基础研究的机遇与挑战[J].自然杂志,2008,30(1):6-11.
- [3] 宋阳,刘连友,严平.风水复合侵蚀研究述评[J].地理学

报,2006,61(1):77-88.

- [4] 海春兴,史培军,刘宝元,等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J].水土保持学报,2002,16(2):50-52.
- [5] 李秋艳,蔡强国,方海燕.风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J].地理科学进展,2010,29(1):65-72.
- [6] 张平仓,唐克丽.六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J].水土保持学报,1997,3(2):32-40.
- [7] 高学田,唐克丽.风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征[J].水土保持通报,1996,16(3):27-31.
- [8] 张庆印,樊军,张晓萍.水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J].水土保持学报,2012,26(2):75-79.
- [9] 杨岩岩,刘连友,曹恒武.沙漠—黄土过渡带风水复合侵蚀营力特征:以靖边县为例[J].干旱区研究,2012,29(4):692-698.
- [10] 谢云,刘宝元.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [11] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报,2015,70(9):1503-1515.
- [12] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, 17(4): 162-165.
- [13] 杨兴华,何清,李红军,等.塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].中国沙漠,2012,32(4):990-995.
- [14] 王金南,逯元堂,周劲松,等.基于GDP的中国资源环境基尼系数分析[J].中国环境科学,2006,26(1):111-115.
- [15] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空变化格局[J].生态学报,2010,30(5):1312-1321.

(上接第18页)

- [10] 中华人民共和国国家林业局. LY/T1840—2009. 喀斯特石漠化地区植被恢复技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [11] 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,1978.
- [12] 沈慧,姜凤岐,杜晓军,等. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报,2000,11(3):345-348.
- [13] 刘淑娟,张伟,王克林,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因[J]. 应用生态学报,2010,21(9):2249-2256.
- [14] 史东梅,吕刚,蒋光毅,等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):35-39.
- [15] 汪天祥,许士国,韩成伟. 改进主成分分析法在南淝河水水质评价中的应用[J]. 水电能源科学,2012,30(10):

33-36.

- [16] 章明奎,韩常灿. 浙江省丘陵土壤的抗蚀性[J]. 浙江农业学报,2000,12(1):25-30.
- [17] 张伟,陈洪松,王克林,等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1459-1463.
- [18] 王小彬,蔡典雄,张志田,等. 土壤颗粒大小对水、肥保持和运移的影响[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1):64-68.
- [19] 周运超,王世杰,卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境,2010,38(1):1-7.
- [20] 盛茂银,熊康宁,崔高仰,等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报,2015,35(2):434-448.