

降雨因子对喀斯特石漠化发生发展的影响研究

谷晓平^{1,2}, 于飞^{1,2}, 刘云慧³, 罗宇翔^{1,2}

(1. 贵州省山地环境气候研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 3. 中国农业大学 资源环境学院, 北京 100094)

摘要: 石漠化的形成有其深刻的自然背景与社会背景, 研究石漠化发生发展的驱动机制是喀斯特脆弱生态系统恢复与重建的必要条件。为了定量研究气候要素对石漠化发生发展的影响, 综合选取地理要素、气候要素、人口要素、社会经济要素、人地关系要素中对石漠化具有驱动作用的因子。用这些驱动因子与石漠化指数进行相关性分析, 并选取显著相关的部分驱动因子进行偏最小二乘回归分析。利用变量投影重要性指标(VIP)来定量衡量各驱动因子对石漠化影响的重要性, 从而定位气候要素对石漠化发生发展影响的作用。分析认为石漠化的发生发展主要是由自然地理因子决定的, 自然气候要素特别是暴雨为石漠化的发生发展提供了直接的驱动力, 并随着雨量级的增加其对石漠化的驱动作用越强。

关键词: 贵州; 喀斯特石漠化; 气候因子; 驱动力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0066-05

中图分类号: P642.253

Impact of Precipitation Factor on Rocky Desertification in Karst Areas

GU Xiaoping¹, YU Fei^{1,2}, LIU Yunhui³, LUO Yuxiang^{1,2}

(1. Guizhou Institute of Mountainous Environment Climate, Guiyang, Guizhou

550002, China; 2. Guizhou Key Laboratory of Mountainous Climate and Resources, Guiyang, Guizhou

550002, China; 3. College of Resources and Environment of China Agriculture University, Beijing, 100094, China)

Abstract: The rocky desertification is a result of both nature processes and societal activities. Studying the driving mechanism of the rocky desertification is a prerequisite of restoring and rebuilding the karst fragile ecosystem. In order to quantify the effect of the climatic factor on the rocky desertification, all potential driving forces were selected including elements of physical geography, climate, population, community economy and the man-land relationships. These elements were correlated to a rocky desertification index, and the significant factors were then used in the partial least square(PLS) regression analysis. The significance of all kinds of driving factors for the rocky desertification were judged quantitatively by utilizing a variable importance projection(VIP) index. The analysis shows that the physical geography element is the primary factor causing the rocky desertification, but the climatic element, especially precipitation amounts, is one of the direct driving forces, which increases as precipitation levels increase.

Keywords: Guizhou Province; karst rocky desertification; climatic factor; driving force

石漠化即石质荒漠化, 是指在亚热带喀斯特地区脆弱的生态环境条件下, 由于自然或不合理的人类活动的作用, 导致植被遭受破坏土层严重流失而引起基岩逐步裸露的生态退化、地表呈现荒漠化景观的过程。西南地区的石漠化问题如同西北地区的荒漠化一样, 是我国现阶段所面临的重大生态环境问题之

一, 近年来引起众多专家学者的高度重视, 并成为研究热点。

在过去的几十年, 我国学者对石漠化的成因研究较多并达成一定共识, 喀斯特石漠化是复杂的生态环境和社会因素共同作用的结果, 是地质、地貌、植被、土壤、气候等自然背景因素和不合理的人类活动综合

收稿日期: 2010-04-14

修回日期: 2010-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“贵州省喀斯特石漠化的气候效应及机理研究”(40765004); 国家自然科学基金项目“山地气候对烟草赤生病影响及机理研究”(41040039); 公益性行业(气象)科研专项“特色林果气象灾害监测预警关键技术”(GYH Y201106024); 贵州省科技厅项目“贵州山地气候资源监测与评估”黔科合人才团队[2010]4012; 贵州省科技厅“贵州省山地气候与资源重点实验室能力建设”黔科合计 Z 字[2009]4006

作者简介: 谷晓平(1968—), 女(汉族), 黑龙江省林口县人, 博士, 研究员, 主要从事应用气象与生态环境研究。E-mail: guxiaoping68@sina.com。

作用的产物^[1-6]。极易淋溶风化的碳酸岩地貌为石漠化提供了物质基础, 构造运动产生的较大的地表切割和地形坡度为石漠化提供了动力潜能。温暖湿润的季风气候为石漠化、碳酸岩地貌强烈发育和土壤淋溶提供了必要的侵蚀营力和溶蚀条件。人为因素是石漠化形成的驱动因素。人口过快增长超过了喀斯特地区的生态环境承载压力, 毁林开荒、陡坡耕种、广种薄收等落后的生产方式加快了林地的水土流失, 加之过度放牧、反复伐薪采樵、非法采石采矿取土对土地的掠夺性利用, 加快了环境恶化。

气候背景是石漠化发生发展过程中一个重要因素, 强暴雨对地表的冲刷易造成水土流失^[4], 充沛而集中的降雨为水土流失提供了强大的动能^[2]。以往的这些研究定性地论述了气候背景对石漠化的影响, 但是气候在石漠化的发生发展过程的作用如何, 至今未有定量的描述。贵州是全国石漠化面积最大的省份, 是西南喀斯特区域中心, 已经存在的石漠化土地

面积为 $3.59 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省国土面积的 20.4%, 而且石漠化仍以平均每年 933 km^2 的速度不断恶化, 如再加上具有潜在石漠化的土地, 面积可达到 45.2%, 严重影响到人类的生存条件, 并引发大量的地质—生态环境问题。

本文在前人研究的基础上, 以贵州省为研究区域, 综合地理环境、气候环境、社会、人口、经济等因素的资料, 分析各因子与喀斯特石漠化之间的关系, 定量研究气候要素在石漠化发生发展过程的作用。

1 研究方法

1.1 评价指标体系建立

1.1.1 喀斯特石漠化程度的表征方法 在一个地域单元里, 石漠化存在多种类型, 熊康宁等^[7]将喀斯特地区的石漠化强度分为 6 个级别: 非喀斯特无石漠化、无明显石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化, 各级对应的参考指标见表 1。

表 1 喀斯特土地石漠化等级划分

| 强度等级 | 基岩裸露/ % | 土被/ % | 坡度/ (°) | 植被+ 土被/ % | 平均土厚/ cm |
|--------|---------|-------|---------|-----------|----------|
| 无明显石漠化 | < 40 | > 60 | < 15 | > 70 | > 20 |
| 潜在石漠化 | > 40 | < 60 | > 15 | 50~ 70 | < 20 |
| 轻度石漠化 | > 60 | < 30 | > 18 | 35~ 50 | < 15 |
| 中度石漠化 | > 70 | < 20 | > 22 | 20~ 35 | < 10 |
| 强度石漠化 | > 80 | < 10 | > 25 | 10~ 20 | < 5 |
| 极强度石漠化 | > 90 | < 5 | > 30 | < 10 | < 3 |

为确定一个区域石漠化发育程度的合理表征方法, 研究者提出利用单位面积石漠化强度指数(RD)表示石漠化发育程度, 认为单位面积石漠化强度指数能合理表征一个区域石漠化发育程度^[8], 公式如下:

$$RD = RD_1 + RD_2 \times 1.5 + RD_3 \times 2$$

式中: RD_1 , RD_2 , RD_3 ——分别为轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化的比例。

1.1.2 石漠化驱动因子指标体系建立 喀斯特石漠化形成的影响因子是多方面的, 为了定量研究气候要素对石漠化发生发展的影响, 以及探讨喀斯特石漠化成因机制, 必须综合多方面驱动因子及其相互作用。根据前人对石漠化成因及驱动力的理论研究, 本文选取了对石漠化发生发展影响可能相关的驱动因子指标 46 个。

(1) 自然环境指标。自然环境指标包括了地理要素以及气候要素, 共 26 个指标。地理要素主要选取指标如下: 碳酸盐出露面积比、平均海拔高程、地表起伏指数、 $\geq 25^\circ$ 坡地面积、高原区占国土面积百分

比、山地面积比、植被覆盖率、NPP、河网密度、NDVI 植被指数。

气候要素主要选取指标如下: 平均降雨量、平均分级雨日数(分为 $\geq 50 \text{ mm}$, $\geq 30 \text{ mm}$, $\geq 20 \text{ mm}$, $> 0 \text{ mm}$)、最大日降雨量、平均年积温、平均相对湿度、平均风速、平均最大风速、平均春旱日数、最长春旱日数、平均夏旱日数、最长夏旱日数、平均凝冻日数、最长凝冻日数。

(2) 人类社会指标。人类社会指标包括了人口要素、社会经济要素以及人地关系要素, 共 20 个指标。人口要素主要选取指标如下: 人口密度、贫困人口数、农业人口密度。

人地关系要素主要选取指标如下: 土地垦殖率、土壤侵蚀面积、公路密度、人均耕地比、耕地面积、旱地面积比、水田面积比、农业单位产量。

社会经济要素主要选取指标如下: 人均 GDP、GDP 年平均增长率、经济密度、第三产业比重、第一产业比重、第一产业总值、人均农民纯收入、人均地方财政收入、农业生产总值。

1.1.3 石漠化驱动因子重要性定量分析 根据所建立的喀斯特石漠化驱动因子指标体系,以贵州省 76 个喀斯特县为研究样本,利用相关分析剔除相关系数不显著,以及具有强烈共线性的指标,选取显著相关的影响因子作为因变量进行多元统计分析。

对定量统计分析中统计样本小且存在多重共线性的问题,解决的最好办法是利用偏最小二乘回归模型(PLS)。PLS 是一种新型的多元统计数据分析方法,它将多元线性回归分析、变量的主成分分析和变量间的典型相关分析有机结合起来,充分利用样本信息,能够在样本容量小、自变量多且存在严重多重相关性的条件下进行回归建模^[9-10]。

在偏最小二乘回归分析中,利用变量投影重要性指标 VIP 来测度自变量对因变量的解释能力。其定义为:

$$VIP_j = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^m R_d(y, t_h) W_{hj}^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^m R_d(y, t_h)}} \quad (j=1, 2, \dots, k)$$

式中: $R_d(y, t_h) = r^2(y, t_h)$, W_{hj} ——轴 W_h 的第 j 个分量,用于衡量 x_j 对构造 t_h 成分的贡献大小; $r(y, t_h)$ ——因变量 y 和成分 t_h 的相关系数; k ——自变量个数; m ——成分个数。对于 VIP_j 很大的 x_j ,它在解释 y 时就有更重要的作用。

1.2 资料来源与处理

本研究所采用的 76 个气象站逐年气象数据(1961—2001 年)来源于贵州省气象局。社会经济的统计数据来自《贵州统计年鉴 2001》^[11] 以及《贵州年鉴 2001》^[12]。全省各县石漠化分类统计数据来源于贵州喀斯特石漠化的遥感——GIS 调查数据(2000 年)^[7]。地理地形数据是通过 ArcGIS 9. x 对贵州地区 1:25 万数字高程模型进行空间分析统计提取。年植被净初级生产力(NPP)由 AVIM2 模型所计算^[13-14]。植被指数数据 NDVI 采用从 EOS 数据门户网站(EOS Data Gateway)下载的 MOD13Q1 的产品统计所得。

2 结果与分析

2.1 喀斯特石漠化驱动因子相关分析

首先,根据所建立的喀斯特石漠化驱动因子指标体系,用自然因素、人为因素各指标分别与单位面积石漠化强度指数进行相关分析,通过相关系数统计检验的,筛选出显著相关的指标作为石漠化驱动因子(见表 2)。

2.1.1 地理环境要素对石漠化影响分析 由表 2 可知,在地理环境要素中,归一化植被指数(NDVI)与石

漠化相关最好,并呈负相关。已有研究表明,NDVI 与植物盖度成正比,体现了植被与喀斯特土地石漠化的空间相关性,NDVI 最高值分布在剑河、黎平、天柱等黔东南地区,最低值分布在兴义、六盘水等地区。可以看出,轻、中、强度喀斯特石漠化分布面积随着 NDVI 的减小而递增,这表明 NDVI 是反映土地石漠化程度的一个重要因素。碳酸盐出露面积是石漠化的物质基础,与石漠化发生强度为显著正相关,在碳酸盐分布区,生境干旱、富钙、缺土、多石等特点,植物生长缓慢,若被人为或自然干扰破坏,生境便会急剧恶化,水土流失,形成石漠化,生产力低下,植被难以恢复。贵州是一个强烈喀斯特化的高原山地,地势形成 3 级台阶,碳酸盐类岩石分布十分广泛,高原山地出露地层齐全多样,褶皱、断层、背斜、向斜、断陷盆地、断块山等地貌十分发育,构成了陡峭而破碎的格局,很容易形成水土流失,因此,高原区比例、平均海拔高程反映了地貌类型与石漠化的相关关系,呈显著正相关。

表 2 石漠化驱动因子与石漠化强度指数相关性分析

| 类别 | 因子 | 相关系数 | |
|--------|------------|------------|---------|
| 地理环境要素 | 平均海拔高程 | 0.482** | |
| | 高原区比例 | 0.592** | |
| | 碳酸盐出露面积比 | 0.487** | |
| | NDVI | -0.626** | |
| 自然因素 | 多年平均降雨量 | 0.288** | |
| | ≥50 mm 雨日数 | 0.373** | |
| | 气候背景要素 | ≥30 mm 雨日数 | 0.351** |
| | | ≥20 mm 雨日数 | 0.273* |
| | | 雨日数 | 0.219* |
| | 最大日降雨量 | 0.233* | |
| 人为因素 | 农业人口密度 | 0.305** | |
| | 农业单位产量 | -0.249* | |
| | 土地垦殖率 | 0.216* | |
| | 旱地面积比 | 0.417** | |

注:样本 $N=76$, ** 为显著相关($p=0.01$); * 为相关($p=0.05$)。

2.1.2 气候背景要素对石漠化影响分析 在气候背景要素中,其中降雨要素与石漠化指数呈普遍显著正相关,并且降雨量越大,与喀斯特石漠化的相关性越强。水作为喀斯特土地石漠化作用的溶液、溶剂和流失载体,是喀斯特土地石漠化环境演化的基本动力。如果降水量大且集中,其对地面冲刷剧烈,水土流失加剧,影响着土地石漠化的演化发展速率。并且在这种气候条件下,化学溶蚀作用强烈,岩溶作用以溶蚀为主,地表、地下径流使碳酸岩的溶蚀作用能旺盛进行,一方面形成了绚丽多彩的岩溶地貌景观,另一方

面形成了喀斯特石漠化脆弱生态环境。根据贵州省气候变化的事实^[15], 近 50 a 来贵州年雨日数减少, 但是年暴雨日数增加, 若不采取相应的石漠化治理措施, 减少暴雨导致的水土流失, 将会加剧贵州石漠化的发生发展。

另外, 多年平均年积温、多年平均相对湿度、平均风速、最大风速、平均春旱日数、最长春旱日数、平均夏旱日数、最长夏旱日数、平均凝冻日数、最长凝冻日数与石漠化无法通过相关性检验, 但是气候因子及气象灾害与植被生长、土壤之间的影响是复杂的, 气象灾害对石漠化的影响也将是未来研究的重点和难点。

2.1.3 人为因素对石漠化影响分析 在人为因素中, 其中旱地面积比、水田面积比与石漠化强度呈显著正相关, 体现了土地利用中农业用地与石漠化强度的相关关系。一般耕作旱地多的地区, 多耕作在山地、坡地等涵养水源不足的地区。这样的高坡度的旱耕地, 如不采取科学的保护措施, 在脆弱的喀斯特环境下, 大多在 3~ 5 a 内丧失耕种价值, 又需重新开荒, 形成恶性循环, 加剧了石漠化的发生; 人口密度特

别是农业人口密度以及农业单位产量, 与石漠化也存在一定的相关性。人口增长对粮食、耕地以及生活资源的需求总量增加, 导致毁林废草开荒, 不合理的土地利用, 造成本已脆弱的喀斯特生态环境恶化, 农业生产艰难, 土地生产力低下, 农业单位产量自然上不去, 造成了地区贫困, 制约了社会经济的可持续发展。

2.2 喀斯特石漠化驱动因子重要性定量分析

喀斯特石漠化形成的影响因子是多方面的, 探讨喀斯特石漠化成因机制必须综合多方面驱动因子及其相互影响。根据前面的相关分析, 剔除相关系数不显著, 以及具有强烈共线性的指标, 选取具有代表性的驱动因子: 平均海拔高程(X_1), 高原区比例(X_2), 碳酸盐出露面积比(X_3), NDVI(X_4), 农业人口密度(X_5), 农业单位产量(X_6), 旱地面积比(X_7), 多年平均降雨量(X_8), 大于 30 mm 雨日数(X_9) 共 9 个因子作为自变量, 单位面积石漠化强度指数(RD) 作为因变量进行偏最小二乘回归分析, 利用变量投影重要性指标 VIP 来定量测度驱动因子对石漠化影响的重要性, 结果见表 3。

表 3 驱动因子对石漠化影响重要性分析

| 自变量 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VIP | 1.153 | 1.078 | 1.357 | 1.153 | 0.624 | 0.334 | 0.907 | 0.774 | 1.093 |

通过变量投影重要性可以看出, 各变量对石漠化变化有重要解释作用。据表 3 得到对喀斯特石漠化起主导作用的驱动因子排序, 由大到小分别为: 碳酸岩面积比(X_3) > NDVI(X_4) > 平均海拔(X_1) > 大于 30 mm 雨日数(X_9) > 高原比(X_2) > 旱地面积比(X_7) > 多年平均降雨量(X_8) > 农业人口密度(X_5) > 农业单位产量(X_6)。

从分析结果可以看出, 石漠化的发生发展主要是由自然地理要素因子决定。气候要素因子仅次于自然地理要素, 是石漠化发生发展的重要主导因子, 特别是暴雨是喀斯特石漠化的直接驱动力之一。再次是人为因素, 其本质上是改变了部分自然地理要素, 从而增强了气候要素因子与自然地理要素因子之间的作用效应, 间接驱动了石漠化的发生发展。

3 结论

目前对于气候要素对喀斯特石漠化发生发展的影响还存在着一定的争议, 对各气候要素作用的大小的确定也存在一定的难度。本研究对石漠化驱动力指标进行了严格的筛选, 并只以贵州省 76 个喀斯特县为研究样本, 剔除非喀斯特县样本的影响, 利用各驱

动力指标与石漠化指数进行相关分析及严谨的数学推导, 定量研究了气候要素特别是降水对石漠化发生发展的影响。气候要素因子仅次于自然地理要素, 是石漠化发生发展的重要主导因子, 特别是暴雨是喀斯特石漠化的直接驱动力之一, 在所选因子中列第 3 位。

经过综合定量分析地理要素、气候要素、人口要素、社会经济要素、人地关系要素中对石漠化具有驱动作用的因子, 结果表明, 气候要素与石漠化指数具有相关性, 具体地说降雨要素与石漠化指数呈普遍显著正相关, 并且降雨量越大, 与喀斯特石漠化的相关性越强; 大于 30 mm 雨日数对石漠化指数的重要性 VIP 为 1.093。气候因子仅次于地理要素因子, 是石漠化发生发展的重要主导因子之一, 其中相关性及其重要性指标最大的是暴雨因子。

虽然本研究中气温、相对湿度、风速等气候要素与石漠化的相关性并不大, 但是气候因素与喀斯特地质、土壤、植被生长演变过程之间的相互影响是一个复杂的系统。在石漠化易于发展的夏、秋季, 白天气温较高, 土壤干燥, 在山、谷风有时构成闭合环流的区域, 白天受谷风影响, 土壤易干裂、松动, 夜间受山风作用, 白天干裂、松动的土壤向谷底迁移的趋势加剧。谷风和山风的循环作用, 使土层越来越薄, 土壤黏性

越来越弱,一旦受强暴雨作用,土壤冲刷加剧,土壤流失率成倍增加。上述天气要素瞬时效应的长期不断叠加,导致基本无土可流,形成基岩裸露的石漠景观。虽然平均春旱日数、最长春旱日数、平均夏旱日数、最长夏旱日数、平均凝冻日数、最长凝冻日数与石漠化无法通过相关性检验,但对气候要素对石漠化发生发展的驱动机制还需要更加深入细致的研究。在深入研究石漠化演变规律及其制定减缓石漠化进程的气象对策过程中,必须加强石漠化天气、气候效应及气象灾害影响的研究。

不同地区由于气候、地质土壤、石漠化程度以及人为干扰程度的不同而不同。人类活动对植被的破坏一直在持续。灌木砍伐后,残留于土中的根茎仍然能够生长,可农业生产对自然植被的破坏则是毁灭性的。人类活动的作用表现为使非易受侵蚀体转换为易受侵蚀体,为原本不具备侵蚀条件的地区创造侵蚀条件,并且由于人类活动导致气候变化,极端天气事件增加,暴雨几率增大,加剧了侵蚀的发展。

[参 考 文 献]

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨 [J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 104-104.
- [2] 王德炉. 喀斯特石漠化的形成过程及防治研究 [D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2003.
- [3] 李瑞玲. 贵州岩溶地区土地石漠化形成的自然背景及其空间地域分异 [D]. 贵州 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.
- [4] 袁春, 周常萍, 童立强. 贵州土地石漠化的形成原因及其治理对策 [J]. 现代地质, 2003, 17(2): 181-185.
- [5] 李阳兵, 王世杰, 谭秋, 等. 喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题 [J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 9-14.
- [6] 路洪海, 冯绍国. 贵州喀斯特地区石漠化成因分析 [J]. 四川师范学院学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 189-191, 212.
- [7] 熊康宁, 黎平. 喀斯特石漠化的遥感: GIS 典型研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 168-182.
- [8] 廖赤眉. 广西喀斯特地区土地石漠化与生态重建模式研究 [M]. 北京: 商务印书馆, 2006: 21-231.
- [9] 陈美球, 刘序. 鄱阳湖地区土地利用格局变化驱动力分析 [J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(1): 123-129.
- [10] 索安宁, 巨天珍, 熊友才, 等. 泾河流域土地利用区域分异与驱动力的关系 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(6): 75-80.
- [11] 贵州省统计局. 贵州统计年鉴 2001 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001: 389-654.
- [12] 贵州省统计局. 贵州年鉴 2001 [M]. 贵州 贵阳: 贵州统计出版社, 2001: 423-685.
- [13] 何勇, 董文杰, 季劲钧, 等. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 345-349.
- [14] 谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 等. 近 20 年气候变化对西南森林净初级生产力的影响 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 251-259.
- [15] 吴战平, 许丹. 贵州气候变化的科学事实 [J]. 贵州气象, 2007, 31(4): 3-4.
- [12] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 126-133.
- [13] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.
- [14] 汤英, 周宏飞, 徐利岗. 荒漠植被影响下的沙地稳定入渗率变化特征 [J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 235-239.
- [15] 徐丽恒, 王继和, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征 [J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 690-695.
- [16] 杨素宜. 土壤含水量对浑水入渗能力的影响 [J]. 太原大学学报, 2010, 11(2): 127-130.
- [17] 钱一兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性 [J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 655-660.
- [18] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘粒度特征与成因探讨 [J]. 地理研究, 1998, 17(2): 178-184.
- [19] 哈斯, 王贵勇. 沙坡头地区新月形沙丘粒度特征 [J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 274-275.
- [20] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 不同黏粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 74-77.
- [21] 徐芹选, 赵景波, 祁晓丽. 黄土孔隙度及粒度组成关系初探 [J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(1): 67-70.
- [22] 刘元波, 陈荷生, 高前兆, 等. 沙地降雨入渗水分动态 [J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 143-150.
- [23] 谭增任, 周兴智. 腾格里沙漠地下水及西部富水带的开发问题 [J]. 水文, 1985(4): 16-22.
- [24] 冯起, 程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义 [J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 225-236.

(上接第 16 页)