

# 坡度对紫色土坡耕地侵蚀性降雨值的影响

周大湖<sup>1,2</sup>, 熊明彪<sup>2</sup>, 林立金<sup>3</sup>, 王欢欢<sup>1</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 四川省水土保持生态环境监测总站,  
四川 成都 610041; 3. 雅安市水利局, 四川 雅安 625000)

**摘要:** 侵蚀性降雨标准是指将发生侵蚀和不发生侵蚀的降雨区分开来的某种降雨参数的临界值。该标准值的确定可以为次降雨是否引起土壤侵蚀和土壤养分流失作出初步判断。利用遂宁水土保持实验站坡耕地小区观测资料, 分析发现同一时间序列中坡度对侵蚀次数有极显著的影响(相关系数  $r = 0.968$ ), 并拟定川中紫色土坡耕地  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  和  $25^\circ$  的侵蚀性降雨的雨量标准分别为 55.7, 42.9, 39.9, 39.5, 32.0 mm; 平均雨强标准分别为 8.87, 7.86, 5.53, 5.36, 5.24 mm/h; PI 标准分别为 552.12, 416.16, 351.09, 331.53, 239.29 mm<sup>2</sup>/h。并通过回归分析拟合了侵蚀性降雨雨量标准与坡度, 平均雨强标准与坡度, PI 标准与坡度之间的函数关系。

**关键词:** 川中紫色土; 侵蚀性降雨; 坡度; 临界值

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0159-04

中图分类号: S157.2

## Influences of Slope Gradient on Erosive Rainfall Valves in Slope Cropland with Purple Soil

ZHOU Da-peng<sup>1,2</sup>, XIONG Ming-biao<sup>2</sup>, LIN Li-jin<sup>3</sup>, WANG Huan-huan<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University,

Chongqing 400716, China; 2. Sichuan Soil-Water Conservation and Ecology-Environment Monitoring

Base, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Soil and Water Conservation Station of Yaan, Yaan, Sichuan 625000, China

**Abstract:** Erosive rainfall standard refers to the critical value of rainfall differentiating the occurrence and non-occurrence of erosion by individual rainfall. The determination of the standard can judge whether or not individual rainfall leads to soil erosion and soil nutrient loss. Based on the observed data from slope cropland runoff plots, it's found that slope gradient has a significant impact on the number of erosion events in the same time series (correlation coefficient  $r = 0.968$ ) and the standard of erosive rainfall in the purple soil area of Mid-Sichuan is drafted. The precipitation standards of erosive rainfall for  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ , and  $25^\circ$  slope croplands are 55.7, 42.9, 39.9, 39.5, and 32.0 mm; the average rainfall intensity standards, 8.87, 7.86, 5.53, 5.36, and 5.24 mm/h; and the PI standards, 552.12, 416.16, 351.09, 331.53, and 239.29 mm<sup>2</sup>/h, respectively. The relationships between precipitation standard and slope gradient, average rainfall intensity standard and slope gradient, and PI standard and slope gradient are fitted by regression analysis.

**Keywords:** purple soil in Mid-Sichuan Province; erosive rainfall; slope gradient; critical value

土壤侵蚀是指在外营力作用下, 土壤颗粒及地表附属物被剥蚀、搬运、沉积的一个过程, 外营力主要是水力、风力、重力。众多研究表明<sup>[1]</sup>, 降雨无疑是造成土壤侵蚀的主要动力来源, 在四川紫色土丘陵区尤其如此。然而并不是所有降雨都会造成土壤侵蚀, 只有部分降雨产生地表径流, 进而引起水土流失才发生真正意义上的土壤侵蚀, 这部分降雨称为侵蚀性降雨。

将发生侵蚀和不发生侵蚀的降雨区分开来的某种降雨参数的临界值, 称为侵蚀性降雨的标准。

Wischmeier<sup>[2]</sup> 根据雨量大小拟定了侵蚀性降雨标准, 一次降雨量若小于 12.7 mm, 则将此次降雨从侵蚀力计算中剔除, 但若此次降雨的 15 min 雨量超过 6.4 mm, 则仍将此次降雨计算在内。Renard 等<sup>[3]</sup> 对美国 Reynolds Creek 流域降雨侵蚀力的计算结果

表明,用全部降雨计算的侵蚀力比剔除小于 12.7 mm 降雨计算的侵蚀力增加了 28%~59%,但径流和侵蚀量是否增加,尚无观测资料加以证明。

张汉雄、王万忠<sup>[4]</sup>以甘肃省西峰坡度为 10° 无覆盖农地观测资料确定侵蚀性降雨标准,5 min 强度为 0.78 mm/min,1440 min 雨量为 55 mm。周佩华、王占礼<sup>[5]</sup>用人工降雨法将不同雨强降雨事件的起流历时和相应的雨强配线,求得土壤侵蚀暴雨标准。江忠善、李秀英<sup>[6]</sup>根据黄土地区降雨径流资料,拟定了该地区侵蚀性降雨标准为次降雨量大于 10 mm,相当于 8.9% 土壤侵蚀量被损失掉,但没有指出多选的降雨事件。王万忠<sup>[7]</sup>等在西北黄土地区求得 20° 无覆盖雨量标准为 8.1 mm,在 28° 人工草地覆盖度大于 65% 时其值为 10.9 mm,洋槐林地(覆盖度为 70%)标准为 14.6 mm,并指出覆盖不同侵蚀性降雨标准不同。张宪奎、杨子生用王万忠方法分别建立了黑龙江及云南滇东北山区的基本雨量标准,分别为 9.8 和 9.2 mm。赵富海、赵宏夫在研究张家口降雨侵蚀力时,确定该地区的侵蚀性降雨标准为次降雨量大于 12.5 mm 或 30 min 最大时段雨强大于 8 mm/h。谢云、刘宝元<sup>[8]</sup>分析了来自黄河流域子洲径流试验站团山沟小流域,团山沟 3 号、7 号和 9 号小区 1961—1969 年径流和降雨观测资料,共有 300 余次降雨过程资料,拟定出坡面侵蚀的侵蚀性雨量标准为 12 mm,平均雨强标准为 0.04 mm/min,最大 30 min 雨强标准为 0.25 mm/min。

综上所述,关于侵蚀性降雨标准问题国内外已做了大量工作,但由于发生地点和自然条件的不同,侵蚀性降雨的标准也各异。我国学者在黄土高原区、云南、东北等区域利用降雨侵蚀力与侵蚀量直接的关系确定雨量或雨强标准,但这些研究并没详细说明观测小区的坡度条件、植被覆盖条件,并且川中紫色土地区侵蚀性降雨标准研究还鲜有报道,因此坡度对侵蚀性降雨标准的影响有待进一步探讨。本研究采用谢云<sup>[8]</sup>和金建君<sup>[9]</sup>的方法,利用川中丘陵区遂宁紫色土水土保持实验站 2002—2005 年共计 4 a 的降雨径流泥沙观测资料,分析了拟定川中丘陵区坡耕地侵蚀性降雨标准,并对坡度对侵蚀性降雨标准的影响作出分析。

## 1 资料与分析方法

### 1.1 资料来源

分析数据来源于遂宁紫色土水土保持试验站,该站位于四川盆地中丘陵区的遂宁市玉丰、安居两镇交界处,地理位置为东经 105°28′51″,北纬 30°21′51″,属

亚热带湿润气候区。海拔 288~330 m,年平均降雨量 902.0 mm,主要集中在 4—9 月;土壤母质为紫色砂泥岩,土壤类型为中生代侏罗纪遂宁组发育的红棕紫色土。此次分析选用了 389 次降雨及径流小区观测资料。摘录降雨过程资料时,如果降雨间歇在 6 h 以内,则算作一次降雨过程,否则分为 2 次降雨过程,然后计算次雨量、平均雨强。分别选取 5°,10°,15°,20°和 25°这 5 种不同坡度的径流观测小区观测数据,小区坡面南向,各小区面积均为 66.64 m<sup>2</sup>,长宽均分别为 9.52 和 7.0 m。各小区土层厚度分别为:5°小区 40—45 cm;10°,15°小区 35—40 cm;20°小区 45—55 cm;25°小区 50—65 cm。分别于 2002—2005 年在各坡度小区进行横坡垄作种植作物,小春种植小麦,大春种植玉米和大豆,部分年份单纯种植黄花,雨季植被覆盖率为 55%~75%。

### 1.2 研究方法

首先对坡耕地 5 种不同坡度径流小区产生侵蚀的降雨次数进行频数分析,根据得出的结论做侵蚀性降雨次数与坡度的回归分析,进而分析坡度差异对侵蚀性降雨标准有较大的影响的可能性。

次降雨侵蚀力  $R$  值计算采用卢喜平<sup>[10]</sup>在紫色土地区提出的 EI 指标计算,即:

$$R = E \cdot I$$

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r)$$

$$e_r = 24.151 + 8.64 \lg I_r$$

式中:  $R$ ——降雨侵蚀力 [MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·a)];  
 $I$ ——次降雨平均雨强 (mm/h);  $E$ ——次降雨总动能 (MJ/hm<sup>2</sup>);  $e_r$ ——某雨强一致的时段内的单位降雨动能 [MJ/(hm<sup>2</sup>·mm)];  $P_r$ ——与  $e_r$  对应的时段雨量 (mm);  $I_r$ ——与  $e_r$  对应的时段雨强 (mm/min)。

侵蚀性降雨标准的拟定采用谢云<sup>[7]</sup>提出的原则,具体过程为:先把所有引起土壤侵蚀的降雨的降雨侵蚀力相加,得到实际降雨侵蚀力;然后把所有降雨事件的雨量按由大到小排列,从最大降雨量开始累加其降雨侵蚀力,直到累加值等于或最接近实际降雨侵蚀力,此时,对应的降雨事件的雨量即被确定为侵蚀性降雨的雨量标准。若把上述过程中的雨量换成相应的平均雨强,则得到侵蚀性降雨的平均雨强标准,再将雨量换成相应的 PI(次降雨量与平均雨强的乘积),则得到侵蚀性降雨的 PI 标准。

由于总会存在发生侵蚀的小雨和不发生侵蚀的大雨,误选不可避免。用降雨侵蚀力偏差系数  $R_{cr}$  表示因误选造成的降雨侵蚀力计算误差:

$$R_{cr} = \frac{R_{mis} - R_{ext}}{R_{tot}}$$

式中:  $R_{\text{mis}}$  ——发生侵蚀而被漏选的降雨侵蚀力之和;  $R_{\text{ext}}$  ——不发生侵蚀而被误选的降雨侵蚀力之和;  $R_{\text{tot}}$  ——所有降雨侵蚀力之和。降雨侵蚀力偏差系数介于 0 和 1 之间, 当为 0 时, 表示漏选的降雨侵蚀力与误选的降雨侵蚀力相等, 这种漏选和误选的误差相抵, 使降雨侵蚀力的计算精度达到最高。当为 1 时, 表示所有降雨全部剔除, 或全部选取, 侵蚀力计算精度最差。

拟定的侵蚀性降雨标准是否合理, 从以下几方面评价: 一是对侵蚀性降雨侵蚀力计算精度的影响; 二是对降雨发生侵蚀的区分能力; 三是可减少的工作量。为了评价标准的区分效果, 定义 2 个指数: 错选度(MI)和剔除率(EFF)。它们分别为:

$$\text{错选度(MI)} = (N_{\text{mis}} + N_{\text{ext}}) / N_{\text{tot}}$$

$$\text{剔除率(EFF)} = N_{\text{del}} / N_{\text{tot}}$$

式中:  $N_{\text{mis}}$  ——发生侵蚀而被剔除的降雨次数;  $N_{\text{ext}}$  ——未发生侵蚀而被误选的降雨次数;  $N_{\text{tot}}$  ——总降雨次数;  $N_{\text{del}}$  ——剔除的总降雨次数。错选度反映了标准对降雨事件能否发生侵蚀的区分能力, 取值介于 0 和 1 之间。值越大, 表明错选的降雨事件比例越高, 标准的区分能力越弱, 反之则越灵敏。剔除率反映了使用标准后, 大致可减少的工作量。前文提到的降雨侵蚀力偏差系数反映了标准对侵蚀力计算精度的影响。当偏差系数和错选度趋于 0, 而剔除率趋于 1 时, 表明侵蚀性降雨标准的区分效果最好, 反之则差。

## 2 分析结果

### 2.1 频数分析

通过对遂宁水土保持试验站 2002—2005 年共计 389 次降雨在不同坡度小区中造成土壤侵蚀的次数进行频数分析, 4 a 历次降雨造成  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  径流小区土壤侵蚀次数分别为 9, 16, 22, 23, 27 次; 由此可见坡度对土壤侵蚀的发生有着非常显著的影响。通过对降雨次数及小区坡度进行相关性分析可以发现, 小区坡度与侵蚀次数相关系数  $r = 0.968$ , 两尾检验显著性水平为极显著, 这表明土壤侵蚀次数与坡度有着十分密切的关系。采用 3 种不同的函数对侵蚀次数与小区坡度进行回归分析可以发现, 其判定系数  $R^2$  均大于 0.93, 显示显著性均达到极显著。其中 S 型函数与对数函数显著性水平达 0.001 判定系数为 0.986, 线性函数显著性水平为 0.007, 判定系数为 0.938, 因此  $Y = e^{(3.507 - 6.667/x)}$ ,  $Y = -8.760 + 10.970 \ln x$  和  $Y = 6.5 + 0.86x$  均可以表达中长时间序列中侵蚀性降雨事件的发生次数与坡度之间的函数关系。

### 2.2 侵蚀性降雨标准拟定

通过对川中紫色土地区植被覆盖率为 55% ~ 75%, 采取横坡开箱种植方式耕作的 5 个不同坡度径流小区 4 a 内共计 389 次降雨观测数据进行侵蚀性降雨标准拟定。

根据拟定结果分析发现: 川中紫色土丘陵区:  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  坡耕地侵蚀性降雨雨量标准分别为 55.7, 42.9, 39.9, 39.5, 32.0 mm, 偏差系数  $R_{\text{co}}$  均小于 0.05, 错选度 MI 均小于 4%, 剔除率达到 94% 以上; 平均雨强标准分别为 8.87, 7.86, 5.53, 5.36, 5.24 mm/h; 偏差系数  $R_{\text{co}}$  均小于 0.06, 错选度 MI 均小于 5%, 剔除率达到 94% 以上; PI 标准分别为 552.12, 416.16, 351.09, 331.53, 239.29 mm<sup>2</sup>/h, 偏差系数  $R_{\text{co}}$  均小于 0.02, 错选度 MI 均小于 5%, 剔除率达到 95% 以上。经综合分析, 雨量标准在各个坡度拟定表现最佳, 偏差系数  $R_{\text{co}}$ , MI, EFF 均是 3 者最优值, PI 标准次之, 平均雨强标准最差。此 3 种侵蚀性降雨标准错选度 MI 均小于 5%, 剔除率都达到 94% 以上, 因此均能用于该区域坡耕地侵蚀性降雨的判定。

紫色土地区拟定的次降雨量标准相对于黄土高原区江忠善<sup>[6]</sup> 拟定的降雨量标准 10 mm, 王万忠等<sup>[1,7]</sup> 在  $20^\circ$  无覆盖地拟定的雨量标准 8.1 mm,  $28^\circ$  人工草地(覆盖度大于 65%) 的雨量标准 10.9 mm, 洋槐林地(覆盖度为 70%) 雨量标准 14.6 mm 明显偏大, 造成这种差异的原因比较复杂。可能由于黄土疏松多孔等特性抗蚀性较差, 造成侵蚀性降雨标准相对较小。另外遂宁站的小区均采用了横坡种植等保土耕作措施, 增加了坡耕地蓄水保土性能降低了水土流失的可能性, 增大了标准值。

由于本次分析资料来源于非标准小区的观测资料或许也会对标准的拟定产生影响, 因此本次拟定的紫色土侵蚀性降雨标准, 能否作为广泛意义的紫色土地区侵蚀性降雨标准有待试验验证, 但该标准对本地区坡耕地水土保持生产实践仍然具有指导意义。根据不同坡度拟定的侵蚀性降雨标准可以快速判定川中地区不同坡度下坡耕地在一次降雨过程是否发生侵蚀, 有助于判断土壤营养元素是否迁移以便对农业生产提出指导。该标准的拟定为降雨侵蚀性力的计算提供参考, 同时也也有助于土壤侵蚀预报模型在该地区的应用。

### 2.3 侵蚀性降雨标准与坡度关系

通过对不同坡度侵蚀性降雨标准的拟定结果分析可以发现, 坡度对侵蚀性降雨的多种标准均有较明显的影响, 总体趋势为侵蚀性降雨标准值随着坡度增大而减小。对不同侵蚀性降雨标准与坡度分别进行非线性

性回归,可以发现侵蚀性降雨雨量标准与坡度成极好的对数函数、逆函数关系,其显著水平达到  $P=0.01$ 、判定系数达到  $R^2=0.92$  以上(表 1;侵蚀性降雨平均雨强标准与坡度成较好的对数函数、逆函数关系,其显著水平达到  $P=0.05$ ,判定系数达到  $R^2=0.85$  以上(表 2);侵蚀性降雨 PI 标准与坡度也成极好的对数函数、逆函数关系,其显著水平达到  $P=0.01$ ,判定系数达到  $R^2=0.92$  以上(表 3)。通过分析可以发现 3 种不同的侵蚀性降雨标准均随着坡度增加而减小,这反应出随着坡度的增加坡耕地产生侵蚀的降雨阈值降低,土壤侵蚀的风险增大。在川中紫色土地区采用保土耕作措施下坡耕地侵蚀性降雨标准。

对数函数  $Y=74.550-12.735\ln x$  能较好表达

侵蚀性降雨雨量标准与坡度的函数关系,  $Y=12.894-2.470\ln x$  能较好表达平均雨强标准与坡度的函数关系,  $Y=840.362-180.107\ln x$  能较好的表达 PI 标准与坡度的函数关系。通过这些函数关系能计算出在一定坡度范围内的侵蚀性降雨标准,有助于侵蚀性降雨标准的精确使用。

### 3 结果及讨论

(1) 通过对不同坡度在 2001—2004 年内产生侵蚀的次数进行频数分析发现,坡度对一定时段内的降雨事件引起侵蚀与否具有极显著的影响,且侵蚀性降雨次数与坡度拟合的函数关系为  $Y=-8.760+10.970\ln x$ ,其中  $x$  为坡度,  $Y$  为侵蚀性降雨次数。

表 1 雨量标准与坡度的非线性回归

函数类型	回归方程	显著性水平 $P$	判定系数 $R^2$
对数函数	$Y=74.550-12.735\ln x$	0.007	0.934
逆函数	$Y=30.527+ x/124.079$	0.009	0.924
二次函数	$Y=62.580-1.99x+0.034x^2$	0.094	0.906
三次函数	$Y=85.260-8.371x+0.520x^2-0.011x^3$	0.029	0.999

表 2 雨强标准与坡度的非线性回归

函数类型	回归方程	显著性水平 $P$	判定系数 $R^2$
对数函数	$Y=12.894-2.470\ln x$	0.012	0.907
逆函数	$Y=4.410+ x/23.478$	0.025	0.854
二次函数	$Y=11.308-0.514x+0.011x^2$	0.062	0.938
三次函数	$Y=9.264+0.060x-0.033x^2+0.001x^3$	0.260	0.958

表 3 PI 标准与坡度的非线性回归

函数类型	回归方程	显著性水平 $P$	判定系数 $R^2$
对数函数	$Y=840.362-180.107\ln x$	0.002	0.972
逆函数	$Y=220.947+ x/1719.976$	0.009	0.924
二次函数	$Y=657.600-25.602x+0.380x^2$	0.041	0.959
三次函数	$Y=858.598-82.072x+4.687x^2-0.096x^3$	0.061	0.998

(2) 川中紫色土丘陵区  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  坡耕地侵蚀性降雨雨量标准分别为 55.7, 42.9, 39.9, 39.5, 32.0 mm; 平均雨强标准分别为 8.87, 7.86, 5.53, 5.36, 5.24 mm/h; PI 标准分别为 552.12, 416.16, 351.09, 331.53, 239.29 mm<sup>2</sup>/h。根据不同坡度拟定的侵蚀性降雨标准可以快速判定川中坡耕地在一次降雨过程是否发生侵蚀,有助于判断土壤营养元素是否迁移以便对农业生产提出指导,也有助于该区域降雨侵蚀性力的计算以及土壤侵蚀预报模型在该地区的应用。

(3) 通过侵蚀性降雨标准与坡度的回归分析得

出,对数函数  $Y=74.550-12.735\ln x$  表达侵蚀性降雨雨量标准与坡度的函数关系,  $Y=12.894-2.470\ln x$  表达平均雨强标准与坡度的函数关系,  $Y=840.362-180.107\ln x$  表达 PI 标准与坡度的函数关系。通过这些函数关系能计算出在一定坡度范围内的侵蚀性降雨标准,有助于侵蚀性降雨标准的精确使用。

由于本次分析的资料来源于遂宁水土保持试验站 2001—2004 年的小区观测资料,仅用 4 a 观测资料拟定侵蚀性降雨标准相对较短可能会影响结论的精度。

(下转第 167 页)

的植被保护措施和充足的降水等因素可使植被较快的恢复,干旱是造成荒漠化主要的自然因子。盐池县位于生态过渡区和植被交错区,生态环境相对脆弱,对气候变化异常敏感,应加强对植被的保护,促进植被多样性的恢复,有利于维护生态系统的完整性。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Fang W, Peng S L. Development of species diversity in the restoration process of establishing a tropical man-made forest eco-system in China[ J ]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 99: 185-196.
- [ 2 ] Ronald M T, Robert Z, Amy B B. Floristic development patterns in a restored Elk River Estuarine Marsh, Grays Harbor, Washington [ J ]. *Restoration Ecology*, 2002, 10: 487-496.
- [ 3 ] William J S. Patterns of species richness and composition in re-created grassland [ J ]. *Restoration Ecology*, 2002, 10 : 677-684.
- [ 4 ] Shumway S W. Facilitative effects of a sand shrub on species growing beneath the shrub canopy [ J ]. *Oecologia*, 2000, 124 : 138-148.
- [ 5 ] 克里施纳默西. 生物多样性教程 [ M ]. 张正明译. 北京: 化学工业出版社, 2006: 25-30.
- [ 6 ] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007: 15-23.

(上接第 162 页)

选择 PI 标准作为侵蚀性降雨标准之一, 主要出于次降雨的雨量、平均雨强比较容易搜集计算使该标准更加具有实用性的目的, 但这可能较  $I_{30}$ 、 $I_{60}$  标准精度低。本次分析资料来源于非标准小区的观测资料或许也会对标准的拟定产生影响, 因此本次拟定的紫色土侵蚀性降雨标准, 能否作为广泛意义的紫色土地区侵蚀性降雨标准有待试验验证, 但该标准对本地区坡耕地生产实践仍然具有指导意义。通过与其它区域拟定的侵蚀性降雨标准相比较, 紫色土地区的标准值明显高于黄土高原拟定的标准, 这可能与拟定区域的土壤状况也有密不可分的关系, 同时遂宁站的小区均采用了保土耕作措施这也是侵蚀性降雨标准偏高的重要原因。因此土壤、植被、耕作制度等因素对侵蚀性降雨标准的影响有待于进一步实证研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 III: 关于侵蚀性降雨标准的问题 [ J ]. *水土保持通报*, 1984, 4 (2): 58-62.
- [ 2 ] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall ero-

- [ 7 ] 卢琦, 李新荣, 肖洪浪, 等. 荒漠生态系统观测方法 [ M ]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 32-39, 66-68.
- [ 8 ] 张金屯. 数量生态学 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2004: 19-40.
- [ 9 ] 彭少麟, 方炜, 任海, 等. 鼎湖山厚壳桂群落演替过程的组成和结构动态 [ J ]. *植物生态学报*, 1998, 22(3): 245-249.
- [ 10 ] 曹成有, 寇振武, 蒋德明, 等. 科尔沁沙地丘间地植被演变的研究 [ J ]. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 262-267.
- [ 11 ] 曹成有. 科尔沁沙地退化生态系统植被恢复与重建机制的研究 [ D ]. 北京: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2002: 58-61.
- [ 12 ] Margal E R. Information theory in ecology [ J ]. *General System*, 1957, 3: 37-71.
- [ 13 ] 朱万泽, 蔡小虎, 何飞, 等. 四川盆地西缘湿性常绿阔叶林不同恢复阶段物种多样性响应 [ J ]. *生物多样性*, 2006, 14(1): 1-12.
- [ 14 ] 蒋有绪, 王作荪, 藏润国, 等. 海南热带林生物多样性及其形成机制 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2002: 217-233.
- [ 15 ] 张克斌, 李瑞, 侯瑞萍, 等. 宁夏盐池县不同荒漠化治理措施植物多样性研究 [ J ]. *中国水土保持科学*, 2004, 2 (4): 66-71.
- [ 16 ] 戈峰. 现代生态学 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2002: 254-255.
- [ 17 ] Tucker C J, Dregne H E, Morton S R. Expansion and contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990 [ J ]. *Science*, 1991, 253: 299-301.

sion losses: A guide to conservation planning [ M ]. U. S. Dep. Agric., Agric. Handb., 1978: 537.

- [ 3 ] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [ M ]. U. S. Dep. Agric., Agric. Handb., 1997.
- [ 4 ] 张汉雄, 王万忠. 黄土高原的暴雨特性及分布规律 [ J ]. *水土保持通报*, 1982, 2(1): 35-44.
- [ 5 ] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准 [ J ]. *水土保持通报*, 1987, 7(1): 38-44.
- [ 6 ] 江忠善, 李秀英. 黄土高原土壤流失方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究 [ J ]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988(7): 40-45.
- [ 7 ] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙与黄河输沙 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [ 8 ] 谢云, 刘宝元. 侵蚀性降雨标准研究 [ J ]. *水土保持学报*, 2000, 12(1): 6-11.
- [ 9 ] 金建君, 谢云, 张科利. 不同样本序列下侵蚀性雨量标准的研究 [ J ]. *水土保持通报*, 2001, 21(2): 31-33.
- [ 10 ] 卢喜平. 紫色土丘陵区降雨侵蚀力模拟研究 [ D ]. 重庆: 西南大学, 2006.