

基于 DEM 的坡形与水土流失的关系 ——以西溪小流域为研究区

季翔^{1,2} 黄炎和^{1*} 林金石¹ 蒋芳市¹ 余明明¹

(1. 福建农林大学 资源与环境学院,福州 350002;

2. 福建省土壤环境健康与调控重点实验室,福州 350002)

摘要 为探讨对水土保持及生态环境的保护具有重要意义的坡形与水土流失关系,弥补以往多基于小区或室内试验的代表性不足,以 DEM 为基础数据,在现有 P 指数的基础上构建了表征纵向坡形的 P_v 指数,并以西溪流域中的小流域为研究区域,分析坡形-水土流失关系。结果表明:1) P_v 指数表征的坡形-水土流失关系更符合小区试验结果,因此在量化纵向坡形方面更合理;2) 总体上,直线坡的水土流失强度最大,然后向凸形坡和凹形坡的方向递减,且凸形坡的水土流失强度大于凹形坡,但坡度 $< 15^\circ$ 时,直线坡的水土流失强度降为最小,向两侧递增;3) 坡形对水土流失的作用小于坡度、大于坡长,且坡度为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 、坡长为 $30 \sim 50$ m 时该作用最显著;3) 坡形对水土流失的作用主要集中在微凸坡和微凹坡与直线坡之间,其他坡形对水土流失的作用较小,因此 P_v 为 $-0.4 \sim -0.2$ 和 $0.2 \sim 0.4$ 时改造坡形对防止水土流失的收效最佳。

关键词 水土流失; 坡形; DEM; 坡度; 坡长

中图分类号 S157

文章编号 1007-4333(2019)02-0161-11

文献标志码 A

Relationship between slope shape and soil and water loss: A case study of Xixi catchment watershed

Ji Xiang^{1,2}, HUANG Yanhe^{1*}, LIN Jinshi¹, JIANG Fangshi¹, YU Mingming¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, China)

Abstract The study the relationship between slope shape and Soil and Water Loss (SWL) taking DEM as main data, P_v index representing profile slope shape is established on the basis of P index, and then taking a catchment in Xixi watershed as the study area to research the relationship between slope shape and SWL. The results show that: 1) The rationality of P_v index on representing profile slope shape is confirmed by comparing with previous studies which based on plot or artificial rainfall experiments. 2) The relationship between slope shape and SWL generally shows SWL at uniform slope is the greatest and descends following the direction of convex slope and concave slope. SWL at convex slope is greater than that at concave slope. However, there is an exception that SWL at uniform slope is the smallest when slope gradient lower than 15° and increases following the direction of convex slope and concave slope. 3) The effort of slope shape on SWL is less than slope gradient and greater than slope length, which is the most significant when slope gradient within $25^\circ - 35^\circ$ and slope length within $30 - 50$ m. 4) The effect of slope shape on SWL is more significant when between micro convex slope and micro concave slope, while the effect at other shapes is more obscure, therefore, transformation slope shape when P_v within $-0.4 - -0.2$ or $0.2 - 0.4$ is the most effective for water and soil conservation. The results can provide a novel way to study the relationship between slope shape and SWL, which is also helpful for the prevention and control on SWL.

收稿日期: 2018-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601557;41571272); 和国家科技支撑计划项目(2014BAD15B0303)

第一作者: 季翔, 讲师, 主要从事景观生态及风险评价研究, E-mail: jixiangss@126.com

通讯作者: 黄炎和, 教授, 主要从事水土保持和崩岗侵蚀研究, E-mail: yanhehuang@163.com

Keywords soil and water loss (SWL); slope shape; DEM; slope gradient; slope length

我国是世界上水土流失 (Soil and water loss, SWL) 最严重的国家之一。水土流失不仅使农业减产、生态环境退化, 对人类生活和社会经济的发展也造成严重威胁。水土流失是气候、土壤、地形和植被等自然要素以及人类对其利用和改造共同作用的结果, 其中地形条件在水土流失中起着关键性的作用^[1-4]。目前主要采用通用水土流失方程 (Universal soil loss equation, USLE) 估算水土流失量, 该方程对于水土流失的地形因素影响主要通过坡度因子和坡长因子体现^[5-7], 关于地形与水土流失的研究也主要集中在这 2 个因子^[8-11]。然而, 坡长不仅受坡度影响^[5-7], 还受到坡面形状的影响, 例如同样坡度时直线坡的坡长小于凸形坡或凹形坡^[12], 这说明坡形在水土流失中具有不可忽视的作用。另外, 从目前的研究结果也可以看出坡形对水土流失的影响显著^[13-18]。如范昊明等^[15]采用小区试验的方法, 发现直线坡的水土流失量最大、凸形坡其次及凹形坡最小。另外, 也有学者通过室内模拟降雨测量 3 类坡形的泥沙产量的得到了相似的结果^[17-18]。小区试验和室内试验是目前研究坡形-水土流失关系较为普遍的方法, 通过该方法所得数据较为准确, 不易受其他因素干扰。但对坡形的划分相对简单, 坡形类别较少, 并且由于场地以及试验设置等限制, 增加坡形类别的可行性较低。因此该方法所获取的数据量不大, 难以建立坡形与水土流失之间的连续性关系。

基于空间高程数据获取坡形可以解决这一问题, 有学者通过地面曲率表征坡形^[19-20], 如李俊^[19]根据总曲率将南沟流域的坡面划分为直线坡、凸面坡和凹面坡 3 种类型。但地面曲率更侧重于反应地面扭曲变化程度而非坡面形状^[21-22]。 P 指数是目前最为明确用于表征坡面形状的指数^[21-23]。坡面对水土流失的影响主要来自于最大坡降方向, 即坡面纵向^[3-7]。然而, P 指数所表征的坡形不仅包括纵向坡形, 也涵盖了横向坡形^[23], 因此该指数在表征坡形-水土流失关系方面不够精确。另外, 坡度、坡长和坡形与水土流失的关系并非独立, 它们之间相互作用、相互干扰^[8-11], 坡形在其他地形因子的作用下与水土流失之间的关系也有待探明。

鉴于此, 本研究以 P 指数为基础, 构建基于 DEM 的表征纵向坡形的指数, 并在此基础上探讨坡

形-水土流失关系以及坡形与坡度/坡长对水土流失的联合关系, 以期进一步明确坡形对水土流失的作用关系, 为水土流失的地形影响机制提供新的研究思路, 并为水土流失的预防和防治工作提供参考依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

西溪流域位于南方花岗岩地区, 土壤多发育为红壤, 风化壳厚且疏松, 由于该区域属于亚热带海洋性季风气候, 降雨量高且集中, 地形以丘陵山地为主, 土壤受水力侵蚀较多^[24-25]。特别是茶园种植区, 地表缺少次级覆被, 表土裸露, 水土流失极为严重, 本研究选择西溪流域中茶园种植较为密集的小流域为研究区域。该小流域位于福建省安溪县感德镇中部, 地理范围为 $25^{\circ}16' \sim 25^{\circ}19'N$, $117^{\circ}47' \sim 118^{\circ}53'E$, 总面积为 $4\,331.4\text{ hm}^2$; 其土壤类型均一, 为花岗岩发育的红壤, 地形以丘陵山区为主, 土地覆被多为茶园, 且茶园的分布与水土流失的空间分布几乎重叠 (图 1)。为排除地形外其他因子的干扰, 选择该区域中的茶园部分作为本研究的具体研究范围, 约 $1\,690.6\text{ hm}^2$ 。该研究范围内气候、土壤和植被等自然要素一致, 且对土地的经营管理方式相似。因此, 该范围在坡形与水土流失关系方面的研究具有较好的代表性。

1.2 数据来源与处理

本研究需要用到的空间数据有: 由福建省测绘局提供的 2000 年 1:1 万地形图, 由福建省水利厅提供的 2008 年 1:1 万水土流失等级图, 由福建省地质测绘院提供的 2009 年 1:1 万土地利用现状图。将以上数据统一到西安 80 坐标系 (3° 带、中央经线 $117^{\circ}E$) 下; 考虑到小区试验常用的面积大小^[13-16], 并且 1:1 万比例尺数据的最佳分辨率为 5 m ^[26], 因此将本研究所有数据统一转换为 5 m 分辨率的栅格数据。

2 方法

2.1 地形因子的选取与量化

水土流失的影响因素繁多且复杂, 不仅包括地形、植被、气候等自然条件, 还受人类对土地利用和改造的影响。本研究的研究范围为小流域内茶园密集种植的区域, 在一定程度上保证了植被、气候以及土地利用的均质性。因此, 在此研究范围内水土流

失的空间差异主要来自于不同地形因子的共同作用,包括坡形、坡度和坡长。

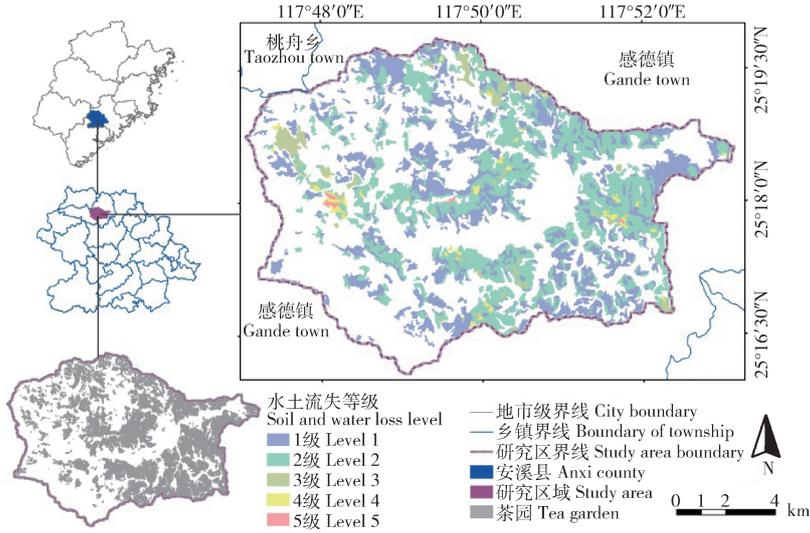


图 1 研究区域位置示意图

Fig. 1 Location sketch map of study area

2.1.1 坡形指数

P 指数是目前较为明确用以描述坡面形状的指数。该指数以 DEM 数据为基础,通过计算中心栅格与邻域栅格高程之间的数量关系表征坡面形状,其计算公式如下:

$$P = H_g - \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{n} \quad (1)$$

式中: H_g 为坡面中心栅格的高程, H_i 为邻域中第 i 个栅格的高程, n 为邻域栅格的个数。该指数为无具体范围, <0 时为凹形坡, $=0$ 时为直线坡, >0 时为凸形坡^[21-23]。

由式(1)可以看出 P 指数所量化的坡形既包括纵向坡形又包括横向坡形,而在坡形对水土流失的作用主要来自于最大坡降方向的影响,即纵向坡形;

另外该指数的取值无具体范围,因此在量化分析时易产生极端值,且由数值对客体的表征也较不直观。因此本研究在 P 指数的基础上做了适用于研究坡形-水土流失关系的改进,记为 P_v 指数。具体思路为:提取出邻域中具有最大坡降的 2 个栅格,与中心栅格组成纵向坡形。如图 2(a)。

图 2(a)中表示 DEM 数据中任意 3 个栅格所形成的坡面。其中,该坡面的坡向如箭头所示, g 为该坡面的中心栅格, u 和 d 分别为该坡面的上游栅格和下游栅格,则该坡面 P_v 指数的计算公式如式(2)。

$$P_v = \frac{[(H_u - H_g) - (H_g - H_d)]}{(H_u - H_d)} \quad (2)$$

式中: H_u 、 H_g 和 H_d 分别表示上游栅格 u 、中心栅格 g 和下游栅格 d 的高程, m 。

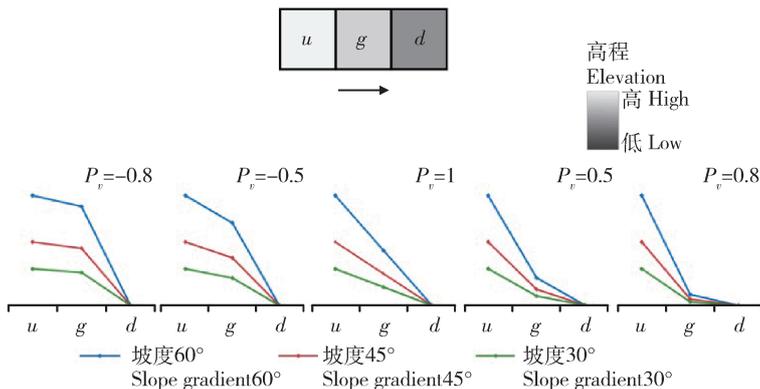


图 2 坡形指数示意图

Fig. 2 Scheme of slope shape index

该指数为(-1, 1), <0 时为凸形坡, =0 时为直线坡, >0 时为凹形坡, 越接近-1 时坡形越凸, 越接近 1 时坡形越凹。如图 2(b) 表示坡度分别为 30°、45° 和 60° 时, P_v 指数不同取值所表征的坡形, 可以看出该指数对坡形的量化不受该坡面总体坡度的影响, 并可直观地表征纵向坡形。

2.1.2 其他地形因子

坡度可由 ArcGIS 的地理分析模块根据 DEM 数据求得, 取值为[0°~90°], 越接近于 0° 地形越平缓, 反之坡面越陡峭。

由于本研究旨在探究坡形-水土流失关系, 需要提取不受坡度和坡形影响的坡长, 即水平坡长。目前对于水平坡长的量化多通过 D8 邻域计算其累积量^[12, 27], 该值可由 ArcGIS 的地理分析模块根据 DEM 数据求得, 取值为 0~+∞。该值越小说明目标栅格的上游栅格越少, 坡面越短; 反之, 上游栅格越多, 坡面越长。由于水流汇聚量的作用是用以提取流域中的河网, 当该值过大时, 地表水汇流成河, 此时不能表征坡面长度。因此, 根据河网提取中的阈值设置以及研究区域的地形特点^[28-30], 保留该指标 200(即 1 000 m) 以下的值, 该部分约占总面积的 98%, 并不影响该因子对区域坡长的表征。

2.2 水土流失强度的量化

本研究用水土流失数据为水土流失等级, 共分为 5 个等级, 等级越高水土流失越严重。由于水土流失面积及其等级在不同区域内的分布具有较强的空间差异性, 因此通过面积加权的方法计算某一区域的平均水土流失等级, 用以表示该区域的水土

流失强度, 称作水土流失指数, 如式(3)。

$$L = \sum_{l=1}^n \frac{l \times S_l}{S} \quad (3)$$

式中: L 为某一区域的水土流失指数; l 为水土流失等级; n 为水土流失等级的数目; S_l 为 l 等级水土流失的面积, m^2 ; S 为该区域的总面积, m^2 。

2.3 统计分析方法

应用 ArcGIS 中相关工具提取出各地形因子, 在对数据进行分布检验和相关性检验后, 将所有数据转换为易于计算的 ASCII 格式; 借助 Matlab 软件对 ASCII 格式的地形因子分别进行级别划分, 然后与水土流失等级数据叠加, 从而计算得各地形因子级别中的水土流失指数。

方差分析用于检验各组数据之间的差异性大小, 从而确定坡形对水土流失的作用是否显著, 以及其与坡度/坡长作用的显著关系。折线图可以直观地展示 2 组变量的关系, 构建坡形类别与水土流失指数的折线图, 从而反映水土流失在不同坡形间的变化, 并通过趋势线的拟合度确定两者之间是否具有连续的映射关系, 并通过折线图中各点的斜率分析水土流失随坡形变化而产生的变异程度。

3 结果与分析

3.1 数据检验

3.1.1 数据的分布检验

为分析坡形与水土流失的关系需要了解数据的基本情况, 根据 ArcGIS 的数据统计功能对各地形因子以及水土流失等级进行传统的数据统计, 结果如表 1。

表 1 各地形因子和水土流失等级数据的基本统计值

Table 1 Descriptive statistics of topographic factors and SWL grade in study area

地形因子和水土流失等级 Topographic factor and SWL grade	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	中位数 Median	标准差 SD	偏态系数 Cs	峰态系数 Bk
P_v 指数	-1.00	1.00	-0.01	0.01	0.2	0.07	8.37
P 指数	-8.88	9.72	-0.02	0.02	0.37	-0.43	14.42
坡度	0	72.00	26.84	27.00	8.51	-0.06	2.84
坡长	0	1 000.00	63.70	30.00	105.45	4.48	28.62
水土流失等级	0	5.00	0.53	0	0.89	1.70	5.50

注: 偏态系数表示数列分布的偏斜程度, 其绝对值越大, 数列偏斜程度越高; 峰态系数表示曲线顶端尖峭或扁平程度, 该值越大, 极值越多。

Note: Cs describes the deflection degree of sequence distribution, the bigger its absolute value is, the more deflective sequence distributes. Bk describes the top of sequence distribution curve is sharp or flat, the bigger its value is, the more extreme value sequence has.

由表 1 中可以看出： P 指数、 P_v 指数和坡度的偏态系数均接近于 0，平均值与中位数也较为接近，说明这 3 个指标均符合正态分布；坡长的偏态系数为 4.48， $\gg 0$ ，这主要是由于该因子是通过累加计算所得，因此小数值的累积分布值较高，属于左偏态分布；由于水土流失等级的数据较为离散，因此该数据并不符合正态分布。

3.1.2 相关性检验

通过各地形因子之间的相关性分析，一方面检验本研究构建的 P_v 指数与目前现有的 P 指数之间的相关性大小，从而判断 P_v 指数表征坡形的可行

性；另一方面检验不同地形因子之间是否独立，保证对水土流失的地形因子作用分析的独立性。通过 ArcGIS 中的波段集统计工具计算各地形因子之间的相关系数，如表 2。

由表 2 中可以看出： P_v 指数与 P 指数的相关系数为 -0.77 ，说明两者之间具有较强的相关关系，由于 P 指数可以表征坡面形状^[21-23]，由此可以假设修正后的 P_v 指数也可表征坡形；另外，各地形因子间的相关系数均 < 0.3 ，这说明所提取的地形因子之间是相互独立的，不存在互相影响和干扰。

表 2 各地形因子之间的相关系数

Table 2 The correlation between each topographic factors

地形因子 Topographic factor	P_v 指数 P_v index	P 指数 P index	坡度 Slope gradient	坡长 Slope length
P_v 指数	1	-0.770^{**}	0.028	0.130
P 指数	-0.770^{**}	1	-0.020	-0.235
坡度	0.028	-0.020	1	-0.030
坡长	0.130	-0.235	-0.030	1

注：* * 表示在 0.01 水平上显著相关(双侧)。

Note: * * means correlation is significant at 0.01 level (two-tails).

3.2 坡形-水土流失关系的总体特征

以坡形指数为基础划分坡形类别，分析各坡形类别中水土流失指数的分布情况，进而得到坡形与水土流失关系的总体特征。由于 2 个指数的分布范围不同，为了使其具有可比性，因此采用标准差法对其进行类别划分，具体如下。

1) P_v 指数。以标准差 0.2 为间距，0 为中心值划分为 10 个类别： $(-1.0, -0.8]$ 极凸坡(记为 T4)、 $(-0.8, -0.6]$ 凸坡(记为 T3)、 $(-0.6, -0.4]$ 小凸坡(记为 T2)、 $(-0.4, -0.2]$ 微凸坡(记为 T1)、 $(-0.2, 0)$ 凸直坡(记为 T0)、 $[0, 0.2)$ 凹直坡(记为 C0)、 $[0.2, 0.4)$ 微凹坡(记为 C1)、 $[0.4, 0.6)$ 小凹坡(记为 C2)、 $[0.6, 0.8)$ 凹坡(记为 C3)、 $[0.8, 1.0)$ 极凹坡(记为 C4)。

2) P 指数。以标准差 0.37 为间距，0 为中心值划分为 10 个类别： $[1.48, +\infty)$ 极凸坡(记为 T4)、 $[1.11, 1.48)$ 凸坡(记为 T3)、 $[0.74, 1.11)$ 小凸坡(记为 T2)、 $[0.37, 0.74)$ 微凸坡(记为 T1)、 $[0, 0.37)$ 凸直坡(记为 T0)、 $(-0.37, 0)$ 凹直坡(记为

C0)、 $(-0.74, -0.37]$ 微凹坡(记为 C1)、 $(-1.11, -0.74]$ 小凹坡(记为 C2)、 $(-1.48, -1.11]$ 凹坡(记为 C3)、 $[-\infty, -1.48]$ 极凹坡(记为 C4)。

分别计算坡形指数中各类别所对应的水土流失指数，做折线图并插入趋势线，如图 3。

图 3(a) P_v 指数和 P 指数中各类别坡形与水土流失指数的折线图及其趋势线，趋势线的拟合度分别为 0.98 和 0.99，说明这 2 个指数与水土流失指数之间均具有较强的相关性以及较连续的映射关系。由这 2 个指数所表征的坡形与水土流失指数的折线图可以看出：1) P 指数和 P_v 所反映的坡形-水土流失关系总体相似，均表现为直线坡的水土流失强度高于凸形坡和凹形坡，而且向两侧(凸形坡和凹形坡方向)递减。2) 但其在凸形坡和凹形坡的水土流失强度方面则完全不同。 P_v 指数中，凹形坡时水土流失强度整体上小于凸形坡时；而 P 指数中，凹形坡时水土流失强度整体上大于凸形坡时。通过小区试验和室内试验得到的结果为直线坡的水土流失强 $>$ 凸形坡 $>$ 凹形坡^[15-18]，这与 P 指数

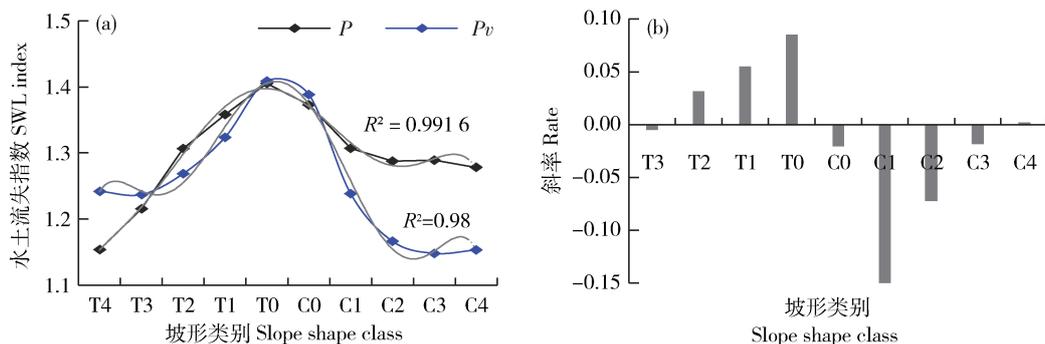


图3 各坡形类别中水土流失强度

Fig. 3 SWL intensity in each type of slope shape factors

反映的坡形-水土流失关系存在差异,但与 P_v 指数反映的坡形-水土流失关系完全一致。坡面水土流失一般是由水力冲刷导致的,而水力冲刷的动能主要来自于坡面最大高差所带来的重力势能。同时, P_v 指数是在确定坡向(即最大高差方向)的基础上计算而得的。由此说明,在表征对水土流失影响较大的纵向坡形方面, P_v 指数相对 P 指数准确,因此 P_v 指数更适用于分析坡形与水土流失之间的关系。

为进一步分析不同坡形对水土流失的影响,计算图 3(a)- P_v 中各点与前一点之间的斜率(图 3(b)),斜率 > 0 说明水土流失强度处于增大趋势, < 0 则为减小趋势,其绝对值越大,说明该坡形对水土流失的影响越大。结合图 3(a)可以看出, $T_4 \sim T_2$ 、 $T_0 \sim C_0$ 和 $C_2 \sim C_4$ 段的斜率较小,而 $T_2 \sim T_0$ 和 $C_0 \sim C_2$ 段的斜率较大,特别是 $T_1 \sim T_0$ 和 $C_0 \sim C_1$ 之间;这说明坡形对水土流失的作用主要集中在小凸坡 T_2 到小凹坡 C_2 之间(P_v 为 $-0.6 \sim 0.6$),特别是微凸坡 T_1 至凸直坡 T_0 之间(P_v 为 $-0.4 \sim -0.2$)和凹直坡 C_0 至微凹坡 C_1 之间(P_v 为 $0.2 \sim 0.4$),其

他坡形对水土流失的作用相对较小。这主要是直线坡时水土流失强度最大,改变坡形所带来的边际效益也就越大。由于微凹坡 C_1 的水土流失强度小于微凸坡 T_1 ,因此在改造坡形防止水土流失时,将直线坡稍微改造为微凹坡 C_1 (P_v 为 $0.2 \sim 0.4$) 的成效最显著。

3.3 基于坡度分异的坡形-水土流失关系

坡度、坡长和坡形共同作用于水土流失,为探究坡形对水土流失之间的关系,需要控制其他因子处于相对稳定的范围。首先由于研究区的坡度为 $0^\circ \sim 72^\circ$,属于丘陵山区,因此按照丘陵山区的坡度划分标准将其分为 6 个级别: $\leq 5^\circ$ 平坡(记为 I)、 $5^\circ \sim 15^\circ$ 缓坡(记为 II)、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 斜坡(记为 III)、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 陡坡(记为 IV)、 $35^\circ \sim 45^\circ$ 急坡(记为 V)、 $> 45^\circ$ 险坡(记为 VI)。然后在每个坡度级别中根据 P_v 指数划分坡形,并计算每个坡度-坡形级别中的水土流失指数。

首先确定坡形和坡度对水土流失作用的是否显著及其显著性大小,对各级坡形和坡度的水土流失强度进行显著性水平为 0.05 的无重复双因素方差分析,结果如表 3。

表3 坡度-坡形的方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of slope gradient and slope shape

地形因子 Topographic factors	SS	df	MS	F	P-value	F crit
坡形	0.16	9	0.02	2.70	0.013 3	2.10
坡度	0.71	5	0.14	21.06	0.000 0	2.42
误差	0.31	45	0.01			
总计	1.19	59				

表 3 中,坡形和坡度的 F 均大于 F_{crit} ,且 P -value 均 < 0.05 ,这说明坡形和坡度对水土流失的作用均显著。由于坡度的 F 与 F_{crit} 之间差值大于坡形,且坡度的 P -value 远小于坡形,说明坡度对水土流失作用大于坡形。

分别作各级坡度中坡形-水土流失指数的折线图,并计算各坡度级别中坡形-水土流失的标准差 d ,该值越大表明不同坡形中的水土流失的差异越大,即坡形对水土流失的作用越显著。具体如图 4。

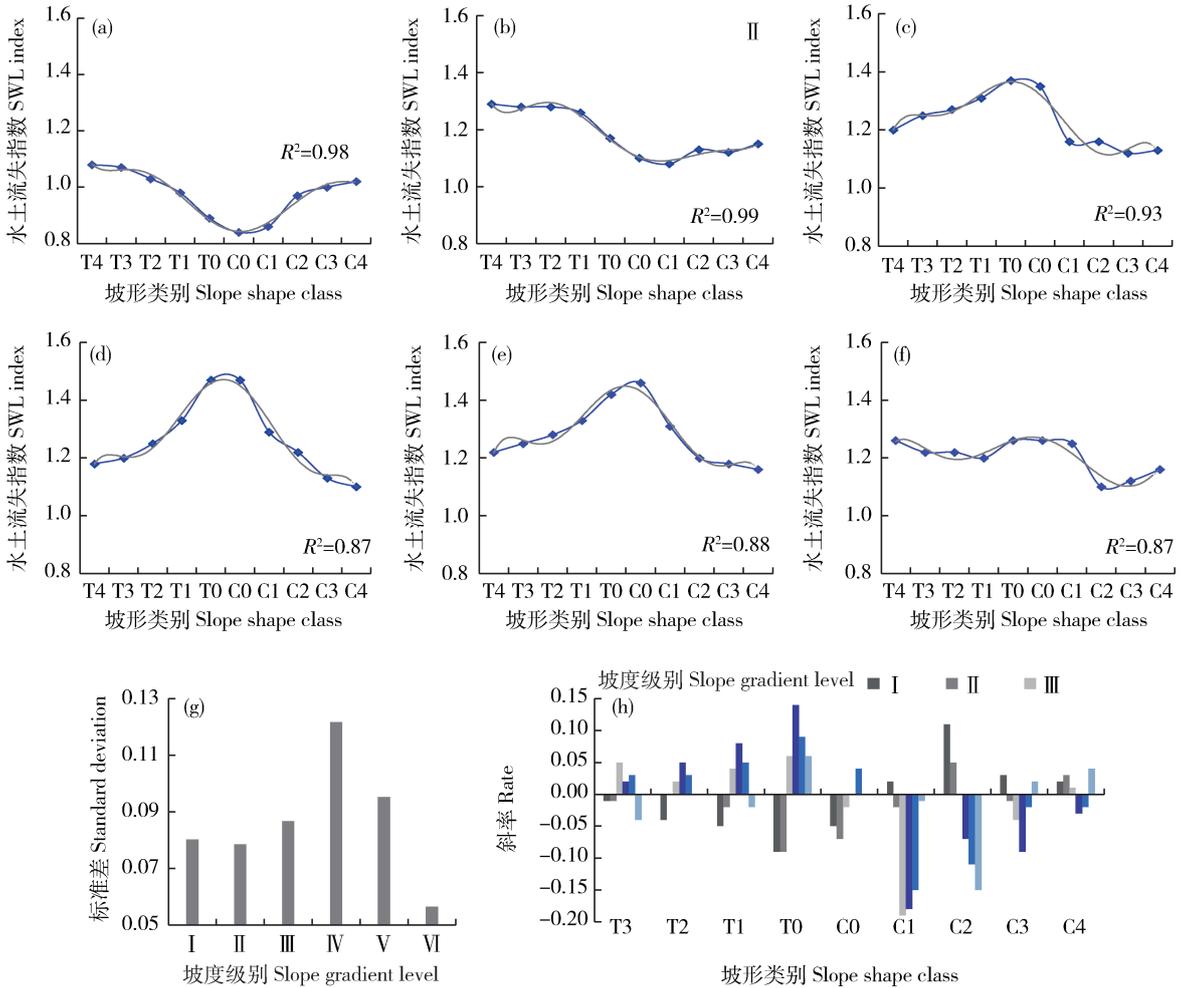


图 4 基于坡度分异的坡形-水土流失关系

Fig. 4 Relationship between slope shape and SWL in each slope gradient level

图 4(a)~(f)为各级坡度中坡形-水土流失折线图,拟合度 R^2 均 > 0.87 ,说明各坡度级别中坡形与水土流失间均具有连续的映射关系。各级坡度中坡形-水土流失的趋势可以大致分为 2 种:1) I-II 级坡度中,直线坡的水土流失强度最小,并且向两侧(凸形坡和凹形坡)递增,整体上凸形坡的水土流失强的大于凹形坡,这与坡形-水土流失的总体特征中直线坡水土流失强度最大的特征相反。这主要是由于坡度极小的直线坡地面起伏较小,难以形成地表

径流,而凸形坡或凹形坡使地面产生起伏,因此其水土流失强于同级坡度的直线坡。2) III-VI 级坡度中,直线坡的水土流失强度最大,并且向两侧(凸形坡和凹形坡)递减,整体上凸形坡的水土流失强度大于凹形坡,这与坡形-水土流失的总体特征相同。其中,VI 级坡度时各坡形之间的水土流失差异较小,这主要是由于在坡度极大时,极凸坡和极凹坡均对应其陡峭的地形,此时土体不仅受地表径流的冲刷侵蚀,还受到自身重力的作用容易发生崩塌或滑坡等

较为剧烈的水土流失现象,从而减小了其与直线坡水土流失强度之间的差距。

图 4(g)为各级坡度中坡形-水土流失指数的标准差。1)在Ⅳ级坡度时,坡形对水土流失的作用最显著,其次为Ⅴ级和Ⅲ级,因此在Ⅲ~Ⅴ级坡度时,要格外注意由于坡形所加剧的水土流失。2)在Ⅵ级坡度时,坡形对水土流失作用的显著性最小,这与图 4(f)中的表现的趋势相符。

图 4(h)为图 4(a)~(f)中各坡形点与前一点之间的斜率。与图 4(a)~(f)对应,该图中各级坡度的坡形-水土流失趋势也可分为两类,Ⅰ~Ⅱ级与Ⅲ~Ⅵ级。1)Ⅰ~Ⅱ级坡度时,T1~T0段的斜率最小,C1~C2段的斜率最大,说明在坡度较小的坡面上进行的坡形改造防治水土流失时,将 T1 坡改造为 T0 坡或将 C2 坡改造为 C1 坡的效果最为显著。2)Ⅲ~Ⅵ级坡度时,T1~T0段的斜率最大,C0~C1

段的斜率最小,这与坡形-水土流失的总体特征一致,说明在坡度较大的坡面上进行的坡形改造防治水土流失时,将 C0 坡改造为 C1 坡或将 T0 坡改造为 T1 坡的效果最为显著。

3.4 基于坡长分异的坡形-水土流失关系

由于坡长为偏态分布,故按照该数据的分位数将其划分为 6 个级别:≤ 5 m 超短坡(记为Ⅰ)、5~15 m 短坡(记为Ⅱ)、15~30 m 中坡(记为Ⅲ)、30~50 m 中长坡(记为Ⅳ)、50~95 m 长坡(记为Ⅴ)和> 95 m 超长坡(记为Ⅵ)。然后在每个坡度级别中根据 P_v 指数划分坡形,并计算每个坡度-坡形级别中的水土流失指数。

首先确定坡形和坡长对水土流失作用的是否显著及其显著性大小,对各级坡形和坡长的水土流失强度进行显著性水平为 0.05 的无重复双因素方差分析,结果如表 4。

表 4 坡长-坡形的方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of slope length and slope shape

地形因子 Topographic factors	SS	df	MS	F	P -value	F crit
坡形	0.32	9	0.04	84.01	0.000 0	2.10
坡长	0.05	5	0.01	21.48	0.000 0	2.42
误差	0.02	45	0.00			
总计	0.38	59				

表 4 中,坡形和坡向的 F 均远大于 F crit,且 P -value 均远<0.05,这说明水土流失在不同级别坡形和坡长间的差异均显著,即坡形和坡长对水土流失均存在较为显著的作用。由于坡形的 F 与 F crit 之间差值远大于坡长,说明坡形对水土流失作用的显著性要大于坡长。

然后,分别作各级坡长中坡形-水土流失指数的折线图,并计算各级别坡长中坡形-水土流失指数的标准差 d ,具体如图 5。

图 5(a)~(f)为各级坡长中坡形-水土流失折线图,其拟合度 R^2 均>0.92,说明各坡长级别中坡形与水土流失间均具有连续的映射关系。各级坡长中坡形-水土流失的趋势与坡形-水土流失的总体特征一致:直线坡>凸形坡>凹形坡,这也进一步说明了坡形对水土流失的作用显著于坡长。

图 5(g)为各级坡长中坡形-水土流失指数的标准差。1)各级坡长中标准差的波动较小,这也说明了坡形对水土流失的作用显著于坡长。2)Ⅳ~Ⅵ级(≥30 m)坡长时坡形对水土流失的作用显著于Ⅰ~Ⅲ(<30 m)级坡长时,且在 30~50 m 时,该作用最显著。

图 5(h)为图 5(a)~(f)中各坡形点与前一点之间的斜率,该值在各级坡长中的趋势相对统一。1)T4~T0 段为增加,T0~C4 段为减小,说明坡形对水土流失的作用先增大后减小,即直线坡水土流失强大最大。2)T1~T0 段最大,C0~C1 段最小,这与坡形-水土流失的总体特征一致,也与Ⅲ~Ⅵ级坡度时坡形-水土流失的特征一致,说明在任何坡长时,将 C0 坡改造为 C1 坡或将 T0 坡改造为 T1 坡的水土流失防治效果最为显著。

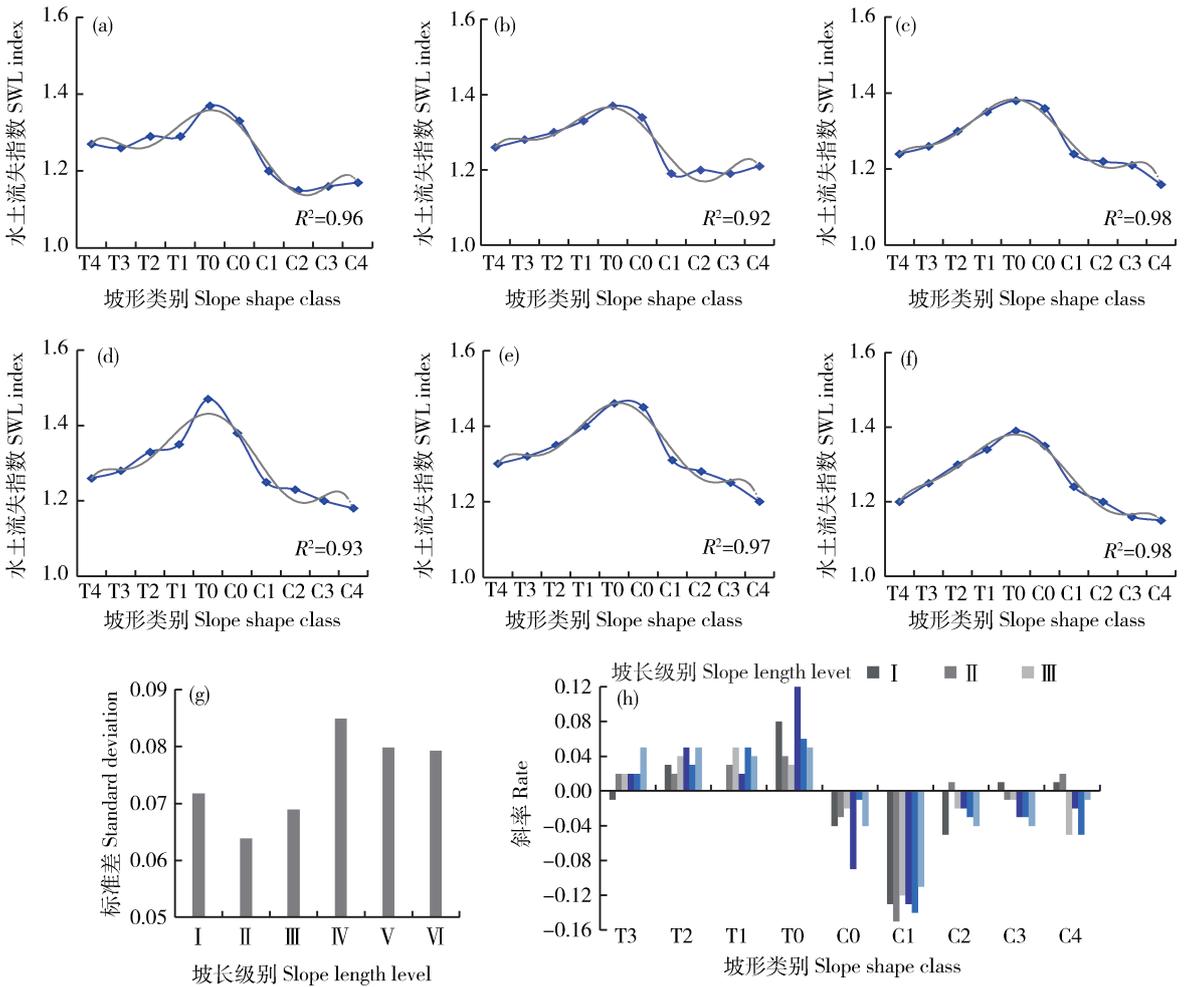


图 5 基于坡长分异的坡形-水土流失关系

Fig. 5 Relationship between slope shape and SWL in each slope length level

4 结论与讨论

本研究为探讨坡形与水土流失之间的关系,以应用较为成熟的 P 指数为基础,构建了表征纵向坡形的 P_v 指数。并以福建省安溪县小流域为研究区域,依据 P 指数和 P_v 指数分别将坡形划分为 10 个类别,通过对比各类坡形中水土流失强度发现, P_v 指数所反映的坡形-水土流失关系更符合现有试验结果(直线坡 > 凸形坡 > 凹形坡)^[13-18],说明 P_v 指数在表征对水土流失影响较大的纵向坡形方面相比 P 指数准确,由此确认了 P_v 指数在表征纵向坡形以及分析坡形-水土流失关系的合理性和准确性。并且由于 P_v 指数符合正态分布,取值为 -1~1,其对坡形的表征较为直观,可直接由数值定位到具体坡形。

在此基础上,进行了基于坡度分异和基于坡长分异的坡形-水土流失分析,得到以下结论:

1) 坡形对水土流失的作用小于坡度、大于坡长,这进一步说明了坡形对水土流失具有不可忽视的作用;总体上,坡形-水土流失关系表现为直线坡水土流失强大最大,凸形坡其次,凹形坡的水土流失强大最小;但当坡度 < 15° 时,凸形坡的水土流失强度仍大于凹形坡,但直线坡的水土流失强度则为最小,这主要是由于极小坡度的直线坡面几乎无起伏,难以形成地表径流,而凸形坡和凹形坡的坡面相较同坡度的直线坡起伏略大,易形成地表径流从而造成水土流失;另外,当坡度 > 45° 时,坡面陡峭,极端坡形同时受水力和重力的作用,从而减小了其与直线坡水土流失强度之间的差距。

2) 坡度为 25°~35°、坡长为 30~50 m 时,坡形对水土流失的作用最为显著;且坡形对水土流失的作用主要集中在微凸坡 T1 至凸直坡 T0 之间(P_v 为 -0.4~-0.2)和凹直坡 C0 至微凹坡 C1 之间(P_v 为

0.2~0.4),在较凸或较凹坡形($P_v < -0.4$ 和 $P_v > 0.4$)的作用较小。说明在 P_v 为 $-0.4 \sim -0.2$ 和 $0.2 \sim 0.4$ 内改造坡形对防止水土流失的收效较为显著,并且由于凹形坡水土流失强度均小于凸形坡,因此将坡形改造为微凹坡C1(P_v 为 $0.2 \sim 0.4$)的成效最佳。

目前,国内学者对坡形-水土流失关系研究结论并非一致,如范昊明得出径流速度为直线坡>凸形坡>凹形坡^[15],而杨丽娜等^[13]和于晓杰等^[14]则认为不论是产流量还是产沙量均是凹形坡>凸形坡>直线坡。由于径流速度与产流量、产沙量为正相关,因此这2种结论是完全相悖的。国外学者在此方面的研究结果相对统一,不仅明确指出了凹形坡具有较强的稳定性^[17],并且得出了与范昊明等^[15]和Sensay等^[16]相同的结论。这2种不同结论的原因主要来自于试验中对坡形的设置,即凸形坡和凹形坡的偏离直线坡的维度是否一致,若不一致则失去了两者之间的可比性。根据这一原则,本研究最终引用了“直线坡>凸形坡>凹形坡”作为坡形-水土流失关系通过试验方法得到的结论。

空间数据是解决数据量限制的重要手段,其关键在于数据指标的提取。本研究以DEM数据为基础,一方面改进了量化纵向坡形的指数,从而解决了研究坡形-水土流失关系的数据量限制问题;另一方面,在此基础上进一步明确了在不同坡度/坡长时坡形-水土流失关系,不仅为研究水土流失的地形因子影响机制提供了新的思路,同时提出了防治水土流失的坡形改造建议。

需要明确的是本研所得结论均为数理统计的结果,因此,该结论在实际工作中的合理性还有待验证。另外,根据DEM数据提取坡形、坡度和坡长等地形因子时会存一定的尺度效应,对于这一问题也有待进一步研究。

参考文献 References

[1] Alves T M, Fetter M, Lima C, Cartwright J A, Cosgrove J, Gangá A, Queiroz C L, Strugale M. An incomplete correlation between pre-salt topography, top reservoir erosion, and salt deformation in deep-water Santos Basin (SE Brazil)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 300-320

[2] Cavalli M, Goldin B, Comiti F, Brardinoni F, Marchi L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models[J]. *Geomorphology*, 2016, 4: 13

[3] Li Y C, Liu C X, Yuan X Z. Spatiotemporal features of soil

and water loss in Three Gorges Reservoir Area of Chongqing [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19: 81-94

[4] 刘新华, 张晓萍, 杨勤科, 李锐. 同尺度下影响水土流失地形因子指标的分析与选取[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 107-111

Liu X H, Zhang X P, Yang Q K, Li R. Analysis and selection of topographical indices influencing soil loss on different scales [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2004, 32(6): 107-111 (in Chinese)

[5] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 程先富. 基于RUSLE模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 28-38

Zhao M S, Li D C, Zhang G L, Cheng X F. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 28-38 (in Chinese)

[6] 潘美慧, 伍永秋, 任斐鹏, 董一帆, 江源. 基于USLE的东江流域土壤侵蚀量估算[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2154-2164

Pan M H, Wu Y Q, Ren F P, Dong Y F, Jiang Y. Estimating soil erosion in the Dongjiang River basin based on USLE[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2154-2164 (in Chinese)

[7] Yoshimura K, Onda Y, Kato H. Evaluation of radiocaesium wash-off by soil erosion from various land uses using USLE plots[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, 139: 362-369

[8] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 苗鸿, 傅伯杰. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 14-19

Wang X K, Ouyang Z Y, Xiao H, Miao H, Fu B J. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 14-19 (in Chinese)

[9] 徐刚. 小流域水土流失地形因素的定量评价与分析: 以黄水河流域为例[D]. 济南: 山东师范大学, 2010

Xu G. Analysis and quantitative evaluation of soil and water loss topography factors in small watershed: The case of Huangshui River basin [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2010 (in Chinese)

[10] 郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 81-89

Guo M H, Yang Q K, Wang C M. Analysis on erosional terrain characteristics of typical samples in main water erosion region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 81-89 (in Chinese)

[11] 徐勇, 杨波, 刘国彬, 刘普灵. 黄土高原作物产量及水土流失地形分异模拟[J]. 地理学报, 2008, 63(11): 1218-1226

Xu Y, Yang B, Liu G B, Liu P L. Topographic differentiation simulation of crop yield and soil and water loss on the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1218-1226 (in Chinese)

[12] 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 刘晴蕊. 基于GIS和多流向算法的流域坡度与坡长估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 159-164

Zhang H M, Yang Q K, Li R, Liu Q R. Estimation methods

- of slope gradient and slope length in watershed based on GIS and multiple flow direction algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(10): 159-164 (in Chinese)
- [13] 杨丽娜, 范昊明, 郭成久, 王铁良, 郑国相. 不同坡形坡面侵蚀规律试验研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(4): 237-239, 243
Yang L N, Fan H M, Guo C J, Wang T L, Zheng G X. Experimental study of soil erosion in different slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(4): 237-239, 243 (in Chinese)
- [14] 于晓杰, 魏勇明. 不同坡形坡面侵蚀产沙过程的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 97-100
Yu X J, Wei Y M. Study on soil erosion characters in different slopes [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 97-100 (in Chinese)
- [15] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 武敏, 于晓杰, 郭成久. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 35-38
Fan H M, Wang T L, Zhou L L, Wu M, Yu X J, Guo C J. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 35-38 (in Chinese)
- [16] Sensoy H, Kara O. Slope shape effect on runoff and soil erosion under natural rainfall conditions [J]. *IForest Biogeosciences and Forestry*, 2014, 7(2): 110-114
- [17] Gray D. Effect of slope shape on soil erosion [J]. *Journal of Civil & Environment Engineering*, 2016, 6(3): 231
- [18] Rieke-Zapp D H, Nearing M A. Slope shape effects on erosion: A laboratory study [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 69:1463-1471
- [19] 李俊. 基于GIS的小流域坡度坡长因子计算方法研究[D]. 西安: 西北农林大学, 2011
Li J. Calculation of slope length and slope gradient factors based on GIS in small watershed[D]. Xian: Northwest A&F University, 2011(in Chinese)
- [20] 黄栋, 乔建平, 张小刚, 陈宇龙. 堆积层斜坡地震动地形效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 587-598
Huang D, Qiao J P, Zhang X G, Chen Y L. Experimental research of the topographic effects of slopes in earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 587-598 (in Chinese)
- [21] 焦超卫. 基于DEM的1:50 000区域尺度水土流失地形因子研究;以黄土高原部分样区的实验为例[D]. 西安: 西北大学, 2006
Jiao C W. A research on 1:50 000 regional soil and water loss topographic factors based on DEM: Sampled on several regions of Loess Plateau[D]. Xian: Northwest University, 2006(in Chinese)
- [22] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 邓良基. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(12): 2434-2443
Deng O P, Zhou X, Huang P P, Deng L J. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan [J]. *Resources Science*, 2013, 35(12): 2434-2443 (in Chinese)
- [23] 张宏, 温永宁, 刘爱利. 地理信息系统算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006
Zhang H, Wen Y N, Liu A L. *Algorithm Foundation of Geographic Information System* [M]. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [24] 林敬兰, 黄炎和, 张德斌, 王妍, 陈起军, 陈记平, 武晓莉. 水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 55-58
Lin J L, Huang Y H, Zhang D B, Wang Y, Chen Q J, Chen J P, Wu X L. Influence of soil moisture content on shear characteristics of Benggang [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 55-58 (in Chinese)
- [25] 葛宏力, 黄炎和, 蒋芳市. 福建省崩岗发生的地质和地貌条件分析[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 128-140
Ge H L, Huang Y H, Jiang F S. Geologic and geomorphologic conditions for slope collapse occurrences in Fujian [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 128-140 (in Chinese)
- [26] 汤国安, 刘学军, 阚国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005
Tang G A, Liu X J, Lv G N. *Principles and Methods of Digital Elevation Model and Geoscience Analysis* [M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)
- [27] 钟霞, 薛重生. 基于栅格模块地形因子提取及其水土流失评价中的应用;以湖北省房县水土流失评价为例[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 92-94
Zhong X, Xue C S. The processing of terrain factors based on the grid module and its applying to estimating soil erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(1): 92-94 (in Chinese)
- [28] 陈东风, 巩伦宝, 李振. 基于不同空间尺度DEM河网提取的阈值选取准则研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(2): 109-113
Chen D F, Gong L B, Li Z. Study on principle of threshold selection of river network extraction based on different DEM scales [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2015, 26(2): 109-113 (in Chinese)
- [29] 魏小强. 空间统计分析组件开发与应用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009
Wei X Q. Spatial statistical analysis of component development and its applied research [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009(in Chinese)
- [30] 陈善沐, 杨玉盛, 林文莲. 福建省亚热带红壤区人为破坏的水土流失与治理定量研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 6-10
Chen S M, Yang Y S, Lin W L. Quantitative research on soil and water loss and countermeasures in man-made destroyed red soil region in subtropical region of Fujian Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 6-10 (in Chinese)