

DOI: 10.5846/stxb201612282691

王雅琼, 张建军, 李梁, 周宇鹏, 张守红, 陈宝强, 赵荣玮, 孙若修, 茹豪. 祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子. 生态学报, 2018, 38(1): 122-131.

Wang Y Q, Zhang J J, Li L, Zhou Y P, Zhang S H, Chen B Q, Zhao R W, Sun R X, Ru H. Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 122-131.

## 祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子

王雅琼<sup>1</sup>, 张建军<sup>1,\*</sup>, 李 梁<sup>1</sup>, 周宇鹏<sup>1</sup>, 张守红<sup>1</sup>, 陈宝强<sup>1</sup>, 赵荣玮<sup>1</sup>, 孙若修<sup>1</sup>,  
茹 豪<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

<sup>2</sup> 山西省林业科学研究院, 太原 030012

**摘要:** 为探索祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性的影响因子及其效应, 采用野外实地放水冲刷法, 以一定体积的冲刷水流含沙量为指标, 对土壤抗冲性进行了研究, 并调查了海拔、坡度、植被高度、植被覆盖度、地上生物量、根系密度、生物多样性、土壤质地等因子, 利用通径分析研究了各因子与土壤抗冲性的关系。结果表明: ①土壤抗冲性与海拔、植被覆盖度、根系密度和土壤砂粒体积分数呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 而与坡度和土壤粉粒体积分数呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与地上生物量和物种丰富度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与植被高度不具备显著相关性; ②通径分析结果显示, 植被覆盖度和根系密度是影响祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性的主导因素, 植被覆盖度对土壤抗冲性的影响主要表现为强烈的直接作用 (0.660), 而根系密度对土壤抗冲性的直接作用相对较小 (0.286), 有较大一部分影响表现为间接作用 (0.174); ③径流含沙量随植被覆盖度和根系密度的增加明显减少, 植被覆盖度与径流含沙量间的关系可用指数或对数形式表达, 根系密度与径流含沙量间的关系可用指数形式表达。研究显示, 在祁连山区典型草地生态系统, 与海拔、坡度、地上生物量、植物多样性、土壤质地等因素相比, 植被覆盖度和根系密度对土壤抗冲性的影响作用更突出, 提高植被覆盖度与根系密度能够有效增强土壤抗冲性。该研究可为祁连山区的土壤侵蚀规律研究及效益评价提供依据。

**关键词:** 土壤抗冲性; 祁连山区; 草地生态系统; 通径分析

## Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains

WANG Yaqiong<sup>1</sup>, ZHANG Jianjun<sup>1,\*</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, ZHOU Yupeng<sup>1</sup>, ZHANG Shouhong<sup>1</sup>, CHEN Baoqiang<sup>1</sup>,  
ZHAO Rongwei<sup>1</sup>, SUN Ruoxiu<sup>1</sup>, RU Hao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> ShanXi Academy of Forestry Sciences, Taiyuan 030012, China

**Abstract:** As a typical ecological functional zone in northwest China, the Qilian Mountains play an important role in soil and water conservation research for alpine and semi-arid areas. Soil anti-scourability (AS) is an important indicator of the ability of soil to resist flow erosion. To investigate the AS and the factors that impact in typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains, the sediment yield of surface runoff was set as an index, artificial field flume experiments were carried out, and correlation, regression analysis, and path analysis were used to analyze the effects of topography, vegetation, and soil properties on AS. Correlation analysis showed that the AS was positively correlated with altitude, vegetation coverage, root density, and sand content at  $P < 0.01$ , negatively correlated with slope and silt content at  $P < 0.01$ , and positively

基金项目: 中国工程院咨询研究项目 (2014-XZ-31-3)

收稿日期: 2016-12-28; 网络出版日期: 2017-09-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

correlated with vegetation diversity and above-ground biomass at  $P < 0.05$ . However, it had no significant correlation with average height of grass. Correlation analysis also showed that there were correlations between some factors (e.g., vegetation coverage and above-ground biomass, altitude, and vegetation coverage), which suggested that there was multicollinearity among factors. To eliminate the multicollinearity and identify the crucial factors, path analysis was used. Path analysis showed that vegetation coverage and root density were crucial factors for the AS of grass ecosystems on the Qilian Mountains. The direct and indirect path coefficients of vegetation coverage were  $-0.660$  and  $-0.075$  respectively, and the direct and indirect path coefficients of root density were  $-0.286$  and  $-0.174$  respectively. This indicates that the influence of vegetation coverage on AS was mainly an intense direct effect, whereas the influence of root density had a weaker direct effect, and there were quite a few non-negligible influences with indirect effects on the AS of root density. The overall contributions of vegetation coverage and root density to the regression equation's  $R^2$  were  $0.485$  and  $0.132$ , respectively. This suggests that vegetation coverage was a more crucial influence factor than root density. Regression analysis was used to determine the relationships between AS and vegetation coverage, and AS and root density. The AS increased obviously with vegetation coverage and root density, the exponential function  $y = 19.73e^{-0.02x} - 3.12$  ( $R^2 = 0.57, P < 0.001$ ) could be used to express the relationship between the sediment yield of surface runoff and vegetation coverage, and the exponential function  $y = 11.15e^{-191.57x} + 0.8$  ( $R^2 = 0.69, P < 0.001$ ) could be used to express the relationship between the sediment yield of surface runoff and root density. This research indicated that vegetation coverage and root density should be considered key factors in the search for soil erosion rules and benefit evaluations on the Qilian Mountains. Thus, it could be used to increase vegetation coverage and root density of grassland ecosystems by protecting existing vegetation and spreading seeds of plants with well-developed root systems to control soil erosion on the Qilian Mountains. It also provided valuable information for general ecological research.

**Key Words:** soil anti-scourability; Qilian Mountains; grassland ecosystem; path analysis

祁连山是我国三大内陆河石羊河、黑河和疏勒河的发源地<sup>[1]</sup>,地处青藏、蒙新和黄土三大高原的交汇处,在自然气候分区上起着非常重要的作用<sup>[2]</sup>。区内水源涵养功能突出,旅游资源丰富,是西北地区重要的生态区。祁连山区具有“高、寒、旱”的特点,其生态系统结构简单,功能单一,是我国典型的生态脆弱区<sup>[3]</sup>,是高寒干旱区水土保持和植被恢复研究的焦点。祁连山区草地面积约占全区总面积的 58%,是主要的生态系统,对防治水土流失具有重要作用。

土壤抗冲性指的是土壤抵抗径流对其机械破坏的性能,是评定土壤抗侵蚀能力的重要指标<sup>[4]</sup>。近年来土壤抗冲性已成为水土保持研究的重点之一,周佩华等<sup>[5]</sup>对土壤抗冲性的测定方法及评价指标进行了探讨,得出实地放水冲刷试验法可较准确地测定土壤抗冲性;张建军、伏耀龙、任乐等<sup>[6-8]</sup>采用野外实地放水法分析了不同地形、土地利用方式和植被条件下的土壤抗冲性,表明坡度、地表覆盖物和土壤质地等对土壤抗冲性有显著影响;李勇等<sup>[9-10]</sup>对黄土高原土壤抗冲性的作用机理及影响因素进行了初步研究,得出土壤砂粒与粗粉粒含量、紧实度以及植物根系等是影响黄土高原土壤抗冲性的主导因素。现有研究及成果多集中于西北高原地区,而在祁连山这种典型生态脆弱区开展的相关研究鲜有报道。

通径分析(Path Analysis)是研究变量间相互关系、自变量对因变量的作用方式和相对重要程度的多元统计分析技术,可将自变量与因变量间的相互关系分解为直接作用与间接作用,并找出与其他自变量相关性很强而引起多重共线性的变量,从而较准确地表现自变量对因变量的影响效应<sup>[11-12]</sup>。已有许多研究利用通径分析对研究对象的影响因素进行了讨论<sup>[11-15]</sup>。为此,本文对祁连山区典型草地生态系统的地形、植被、土壤等因素进行综合调查,利用相关性分析、通径分析和回归分析等方法,研究影响祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性的主导因素以及各因素对土壤抗冲性的影响效应,以期对祁连山区土壤侵蚀研究和生态效益评价提供参考。

## 1 研究区概况

研究区为地处祁连山南麓中段的祁连县,位于青海省海北藏族自治州北部,地理位置为  $37^{\circ}25'16''$ — $39^{\circ}05'48''$ E,  $98^{\circ}05'35''$ — $101^{\circ}02'06''$ N。祁连县地处高寒山区,属典型的高原大陆性气候,平均海拔 3500 m,年日照时数为 2530—3100 h,温度和降水垂直变化明显<sup>[16]</sup>,年均气温约为  $-1.8^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 270—600 mm,主要集中在 6—8 月份,相对湿度约为 53%,年均蒸散发量约为 1529.8 mm<sup>[17-18]</sup>。分布有高山草甸土、高山草原土、山地草甸土、黑钙土、栗钙土等多种土壤类型,其中高山草甸土面积最大,约占全区面积的 45%<sup>[16]</sup>。天然草地以禾本科、菊科、毛茛科、莎草科、豆科、蔷薇科植物为主,主要物种包括:金露梅(*Potentilla fruticosa*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa annua*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)等。

本研究于 2015 年 7—8 月份,在祁连县八宝镇周边的天然草地中共布设 73 个采样点进行实地调查,采样点所处海拔为 2600—3300 m,坡度为  $8^{\circ}$ — $28^{\circ}$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 野外实地放水冲刷实验

采用张建军等设计的野外实地放水冲刷法<sup>[19]</sup>,以一定体积的冲刷水流所含泥沙量作为表征土壤抗冲性的指标,冲刷水流含沙量越小,表示土壤抗冲性越强。该实验装置由供水系统、溢流箱、隔水板和集水槽四部分组成(图 1)。在试验样地选择具有代表性的平整坡地,沿坡面将 2 块长 1 m、宽 0.15 m 的薄铁板相距 10 cm 后插入土中固定,尽量避免扰动土壤,围成一个长 1 m、宽 0.1 m 的冲刷坡面。在冲刷区上、下位置分别安置溢流箱与集水槽,溢流箱的导流板应与坡面土壤密切接触。供水系统是马里奥托瓶,该装置可保证放水流量稳定并可通过阀门控制流量大小。实验前,用洒水壶向坡面均匀洒水,使表层土壤水分达到饱和,避免实验过程中冲刷水流下渗。参考伏耀龙等<sup>[7]</sup>、李强等<sup>[20]</sup>的研究,

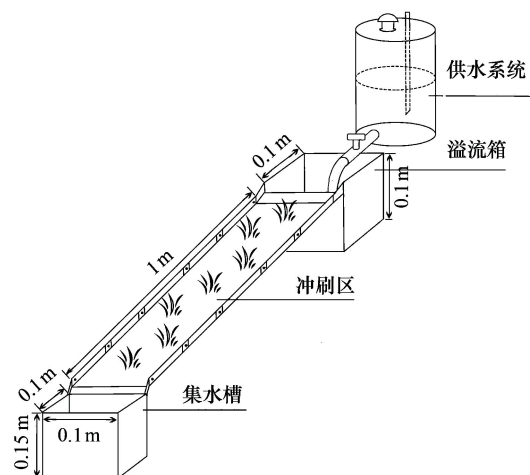


图 1 野外实地放水冲刷实验设备

Fig.1 Artificial flume experiment in field

以约 4 L/min 的流量放水冲刷 3 min<sup>[7,20]</sup>,每个样地重复布设 3 个小区。开始放水后,水进入溢流箱,待溢流箱集满,水流沿导流板均匀流向坡面,最后由集水槽将挟有泥沙的水收集起来。待全部水经过坡面后,将集水槽中收集到的水样搅拌均匀,从中取出 500 mL 装入样品瓶带回实验室,过滤烘干后测定水样中的泥沙含量。

### 2.2 各项因子指标测定方法

用 GPS 仪测定采样点的地理坐标和海拔,用罗盘仪测定坡度。在 0—10 cm 土层取 200 g 左右土壤装入塑封袋带回实验室,用 M3501-XB 激光粒度分析仪测定土壤粒径分布,每个样品做 3 次重复。在研究样地随机设置 5—8 个 0.3 m×0.3 m 的样方,调查样方内植物的高度以及种类、数量、密度、盖度等多样性指标。植被覆盖度采用照相法获取,在每个样方的正上方用数码相机拍照,之后利用 Photoshop 软件对照片进行裁剪、调色等处理增强植被的清晰度,分别提取图像中植被所占的像素值和整个图像的像素值,植被所占像素值与整个图像的像素值之比即为植被覆盖度。将各样方内的植物全部齐地面剪下装入塑封袋中,称量后得该样方植物地上部分鲜重;按植物种类挑取约 100 g 左右样品带回实验室,在  $65^{\circ}\text{C}$  恒温下烘干后称重,得到干鲜重之比,以此计算样方内植物的地上干生物量。在样方中心用直径为 10 cm 的根钻,取 10 cm 土层内的根系带回实验室,用清水将根洗净后于  $65^{\circ}\text{C}$  恒温下烘干称重,得到根系干重,计算样方内植物的根系密度。

## 2.3 通径分析

### 2.3.1 通径系数

某一自变量  $x_i$  与因变量  $y$  之间的相关系数 ( $r_{yi}$ ) 是  $x_i$  与  $y$  的直接作用和所有  $x_i$  与  $y$  的间接作用之和。 $x_i$  对  $y$  的直接作用采用直接通径系数 ( $p_{yi}$ ) 表示,即通过多元线性回归分析得到的自变量  $x_i$  的标准化偏回归系数; $x_i$  通过其余自变量  $x_j$  对  $y$  所起到的间接作用采用间接通径系数 ( $p_{yi} \cdot r_{ij}$ ) 表示,为  $x_i$  与  $x_j$  之间的相关系数 ( $r_{ij}$ ) 和  $x_j$  与  $y$  的直接通径系数 ( $p_{yj}$ ) 的乘积。通径分析过程中,将表征土壤抗冲性的冲刷水流含沙量作为因变量,将海拔、坡度、植被平均高度、植被覆盖度、地上生物量、根系密度、物种丰富度、土壤砂粒 (0.05—2 mm) 体积分数和土壤粉粒 (0.002—0.05 mm) 体积分数作为自变量。首先通过相关性分析得出各影响因子与径流含沙量的相关系数以及影响因子之间的相关系数;然后采用逐步回归法剔除一些影响不显著或存在多重共线性的影响因子,得出最优回归模型,从而得到影响土壤抗冲性的主导因素;最后,将主导因素的回归系数进行标准化得到标准化偏回归系数,即直接通径系数,再利用相关系数与直接通径系数计算得出间接通径系数,从而得到各因素对土壤抗冲性的相对重要性。剩余项的通径系数  $p_{ey} = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^k r_{yi} \cdot p_{yi}}$ ,一般若  $p_{ey}$  较大,则表明误差较大或者还有其他的重要因素未考虑在内。

### 2.3.2 决定系数

决定系数表示自变量对因变量的相对决定程度。某一变量对因变量的决定系数  $d_{y \cdot xi} = p_{yi}^2$  ( $i, j = 1, 2 \dots k$ );两相关变量共同对因变量的相对决定系数  $d_{y \cdot xi \cdot xj} = 2p_{yi} \cdot p_{yj} \cdot r_{ij}$  ( $i \neq j, i, j = 1, 2 \dots k$ ); $x_i$  对回归  $R^2$  的总贡献为直接通径系数  $p_{yi}$  与相关系数  $r_{yi}$  的乘积。决定系数和对  $R^2$  的总贡献值越大,表明该影响因素对土壤抗冲性的作用越强。

## 2.4 数据统计与分析

采用 Excel 整理统计数据,用 Photoshop 软件处理样方照片获取植被覆盖度,用 SPSS 软件进行相关性分析与通径分析,用 Origin 软件绘图并进行线性回归。

## 3 结果与分析

对采样点的海拔、坡度、植被覆盖度、地上生物量、根系密度、物种丰富度、土壤砂粒体积分数和土壤粉粒体积分数进行调查测定,结果见图 2。

### 3.1 土壤抗冲性的相关性分析

为综合研究各项因子对祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性的影响程度,利用 9 项指标与径流含沙量作相关性分析。对数据进行正态转换并检验,K-S 正态检验结果显示各组数据均近似服从正态分布,可进行相关性分析,相关性分析结果见表 1。由表 1 可知:土壤抗冲性与海拔、坡度、植被覆盖度、根系密度、土壤砂粒体积分数和粉粒体积分数间存在极显著相关关系 ( $P < 0.01$ ),其中,与海拔、植被覆盖度、根系密度和土壤砂粒体积分数呈正相关,而与坡度和土壤粉粒体积分数呈负相关;土壤抗冲性与地上生物量和物种丰富度间存在显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ )。可见,祁连山区典型草地生态系统的土壤抗冲性随着海拔、植被覆盖度、根系密度、地上生物量、物种丰富度和土壤砂粒体积分数的增加而增强,随着坡度和土壤粉粒体积分数的增加而减弱。植被覆盖度与径流含沙量的相关系数为 -0.735,明显大于其他因子,表明植被覆盖度对土壤抗冲性的影响作用尤为显著。

由于土壤抗冲性的各影响因子之间也具有一定的线性相关性,且某些因子间的相关性非常显著,这说明影响因素间存在多重共线性,对土壤抗冲性的影响效果交错重叠,所以为了消除多重共线性,进一步获取影响土壤抗冲性的主导因素,需采用通径分析法研究。

### 3.2 土壤抗冲性的通径分析

以海拔  $x_1$ 、坡度  $x_2$ 、植被平均高度  $x_3$ 、植被覆盖度  $x_4$ 、地上生物量  $x_5$ 、根系密度  $x_6$ 、物种丰富度  $x_7$ 、土壤砂

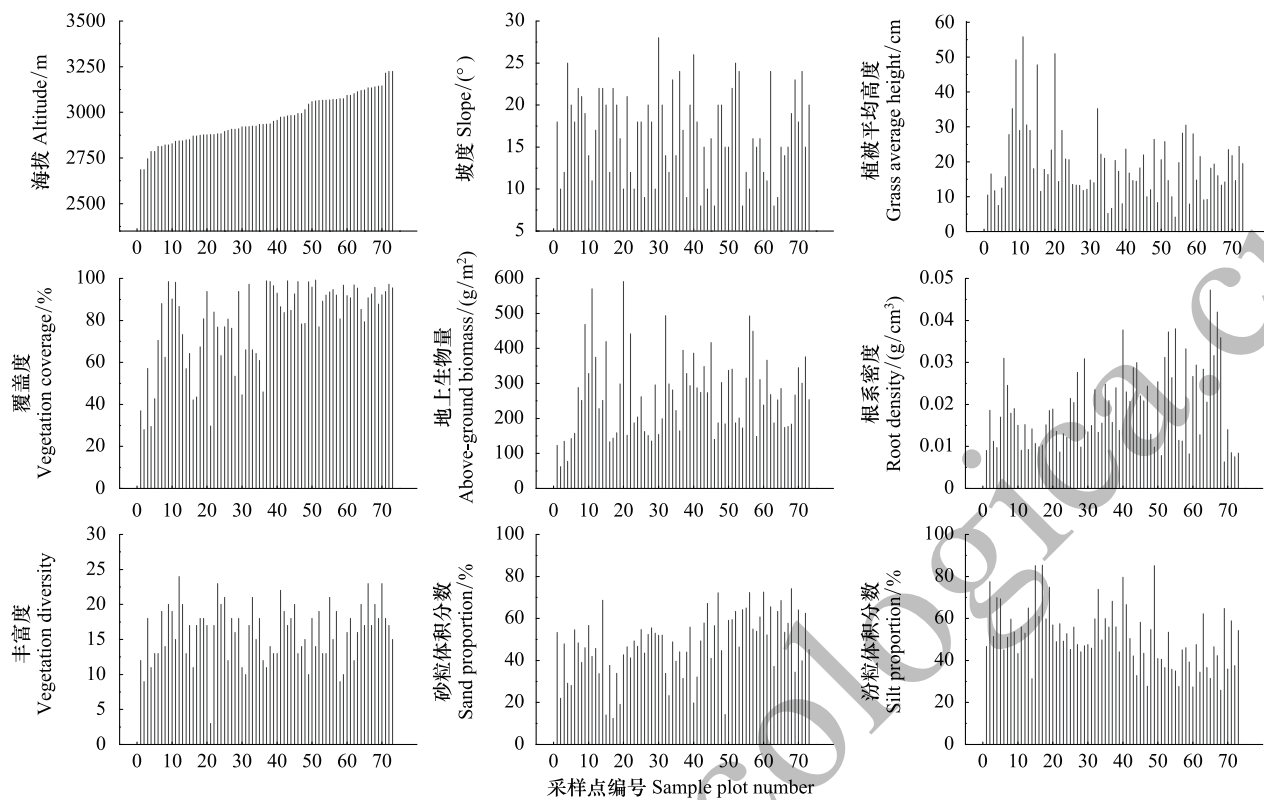


图2 采样点的各项影响因子指标

Fig.2 The indexes of influence factors in sample plots

表1 各项影响因子与径流含沙量间的相关系数

| 影响因子<br>Factors               | 海拔<br>Altitude | 坡度<br>Slope | 植被平均高<br>Grass<br>average<br>height | 覆盖度<br>Vegetation<br>coverage | 地上生物量<br>Above-ground<br>biomass | 根系密度<br>Root density | 物种丰富度<br>Vegetation<br>diversity | 土壤颗粒分布<br>Particle size distribution |            |
|-------------------------------|----------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------|
|                               |                |             |                                     |                               |                                  |                      |                                  | 砂粒<br>Sand                           | 粉粒<br>Silt |
| 坡度 Slope                      | -0.047         |             |                                     |                               |                                  |                      |                                  |                                      |            |
| 植被平均高<br>Grass average height | -0.176         | -0.046      |                                     |                               |                                  |                      |                                  |                                      |            |
| 覆盖度<br>Vegetation coverage    | 0.611**        | -0.295*     | 0.262*                              |                               |                                  |                      |                                  |                                      |            |
| 地上生物量<br>Above-ground biomass | 0.140          | -0.168      | 0.780**                             | 0.597**                       |                                  |                      |                                  |                                      |            |
| 根系密度<br>Root density          | 0.249*         | -0.168      | -0.244*                             | 0.263*                        | -0.092                           |                      |                                  |                                      |            |
| 物种丰富度<br>Vegetation diversity | 0.161          | -0.174      | 0.282*                              | 0.362**                       | 0.316**                          | 0.144                |                                  |                                      |            |
| 砂粒体积分数<br>Sand proportion     | 0.417**        | -0.143      | -0.175                              | 0.310**                       | 0.015                            | 0.292*               | 0.101                            |                                      |            |
| 粉粒体积分数<br>Silt proportion     | -0.407**       | 0.141       | 0.165                               | -0.300**                      | -0.019                           | -0.284*              | -0.102                           | -0.996**                             |            |
| 径流含沙量<br>Sediment yield       | -0.539**       | 0.302**     | 0.017                               | -0.735**                      | -0.287*                          | -0.460**             | -0.270*                          | -0.380**                             | 0.369**    |

\*\* 表示相关性在 0.01 水平上显著; \* 表示相关性在 0.05 水平上显著

粒体积分数  $x_8$  和土壤粉粒体积分数  $x_9$  为自变量,以径流含沙量为因变量  $y$ 。通径分析过程中剔除了影响不显著或存在多重共线性的变量,变量  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_5$ 、 $x_7$ 、 $x_8$ 、 $x_9$  被移除而变量  $x_4$ 、 $x_6$  被选入。可见,在 9 项影响因素

中,植被覆盖度  $x_4$ 、根系密度  $x_6$ 对径流含沙量有较为直接且显著的作用,是影响土壤抗冲性的主导因素。表 2 为植被覆盖度和根系密度与径流含沙量的通径系数,由表 2 可知:植被覆盖度  $x_4$ 、根系密度  $x_6$ 与径流含沙量  $y$  的直接通径系数分别为-0.660、-0.286,间接通径系数分别为-0.075、-0.174,可见植被覆盖度  $x_4$ 对土壤抗冲性的直接作用大于根系密度  $x_6$ ,而对土壤抗冲性的间接作用小于根系密度  $x_6$ ,并且植被覆盖度  $x_4$ 对土壤抗冲性的直接作用远大于间接作用,这表明植被覆盖度对土壤抗冲性的影响主要表现为强烈的直接作用,而根系密度对土壤抗冲性的直接作用相对较小,有较大一部分表现为间接作用。根系密度与植物数量和种类,以及土壤水分、养分和温度等条件相关,这些因素能够直接或间接地影响植被覆盖度,从而间接影响土壤抗冲性。

由相关性分析可知,海拔与土壤抗冲性具有极显著的相关性且相关系数较大,而通径分析结果显示海拔不是影响土壤抗冲性的关键因子,原因可能是海拔与其他因子间存在较强的共线性。由表 1 可知,海拔与植被覆盖度、根系密度和土壤质地间具有显著或极显著的相关性,尤其与植被覆盖度的相关系数高达 0.611,说明在祁连山区,海拔作为重要的环境因素,主要通过影响植被、土壤等因子间接作用于土壤抗冲性,所以不被认为是直接作用于土壤抗冲性的关键因子。

将决定系数按绝对值大小进行排序,结果见表 3。从表 3 可以看出:植被覆盖度  $x_4$ 对土壤抗冲性的决定系数  $d_{y,x_4}$ (0.436)远大于另外两项居首位,其次是植被覆盖度  $x_4$ 与根系密度  $x_6$ 共同对土壤抗冲性的相对决定系数  $d_{y,x_4,x_6}$ (0.099),根系密度  $x_6$ 对土壤抗冲性的决定系数  $d_{y,x_6}$ (0.082)最小;植被覆盖度  $x_4$ 对  $R^2$ 的总贡献大于根系密度  $x_6$ 对  $R^2$ 的总贡献。由此表明,植被覆盖度是影响祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性的最重要指标,提高植被覆盖度可有效增强土壤抗冲性,而在提高植被覆盖度的同时,还应注意植物根系密度的大小,若植物根系密度较大,土壤抗冲性也会增强。

表 2 植被覆盖度和根系密度对径流含沙量的通径系数

Table 2 Path coefficients between sediment yield of surface runoff and vegetation coverage, root density

| 自变量<br>Independent variable           | 相关系数<br>Correlation coefficients( $r_{yi}$ ) | 直接作用<br>Direct effect( $p_{yi}$ ) | 间接作用 Indirect effect   |                        |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                       |                                              |                                   | 通过 $x_4$ Through $x_4$ | 通过 $x_6$ Through $x_6$ |
| 植被覆盖度 $x_4$ Vegetation coverage $x_4$ | -0.735                                       | -0.660                            |                        | -0.075                 |
| 根系密度 $x_6$ Root density $x_6$         | -0.460                                       | -0.286                            | -0.174                 |                        |

表 3 各变量对径流含沙量的决定系数和对  $R^2$  的总贡献排序

Table 3 Determination coefficient of each variable and its contribution to the  $R^2$  for sediment yield of surface runoff

| 排序<br>Order | 名称<br>Name      | 决定系数<br>Determination coefficient | 变量<br>Variable | 对 $R^2$ 的总贡献<br>Contribution to the $R^2$ |
|-------------|-----------------|-----------------------------------|----------------|-------------------------------------------|
| 1           | $d_{y,x_4}$     | 0.436                             | $x_4$          | 0.485                                     |
| 2           | $d_{y,x_4,x_6}$ | 0.099                             |                |                                           |
| 3           | $d_{y,x_6}$     | 0.082                             | $x_6$          | 0.132                                     |

### 3.3 植被覆盖度对土壤抗冲性的影响

利用采样点的植被覆盖度与径流含沙量进行回归分析得出:径流含沙量随着植被覆盖度的增加而明显减少,即土壤抗冲性随着植被覆盖度的增加而明显增强,二者的关系可用指数或对数形式表达(图 3)。指数关系可用公式  $y = 19.73e^{-0.02x} - 3.12$  ( $R^2 = 0.57, P < 0.001$ ) 表达,对数关系可用公式  $y = -9.52\ln(x + 22.12) + 46.14$  ( $R^2 = 0.56, P < 0.001$ ) 表达,两式中: $y$  为径流含沙量, g/L;  $x$  为植被覆盖度, %。两个回归模型的显著性都很强,均可在一定程度上显示土壤抗冲性随植被覆盖度的变化趋势,但相比之下,指数形式表达式的拟合度稍高,对两者的关系表达较优。

### 3.4 根系密度对土壤抗冲性的影响

因植被覆盖度会对土壤抗冲性产生显著的作用,为避免植被覆盖度的变化干扰根系密度对土壤抗冲性的影响,在图 3 基础上选取了具有相同植被覆盖度的采样点,利用根系密度和径流含沙量进行回归分析。结果

显示:径流含沙量随着根系密度的增加明显减少,即土壤抗冲性随着根系密度的增加明显增强,二者的关系可用指数函数  $y = 11.15e^{-191.57x} + 0.8$  ( $R^2 = 0.69, P < 0.001$ ) 表达,式中:  $y$  为径流含沙量,  $g/L$ ;  $x$  为根系密度,  $g/cm^3$  (图4)。由图4可知,当根系密度小于  $0.02 g/cm^3$  时,径流含沙量随着根系密度的增加迅速降低,当根系密度大于  $0.02 g/cm^3$  时,径流含沙量的降低速率减缓并趋于平稳,即土壤抗冲性达到相对稳定的状况。

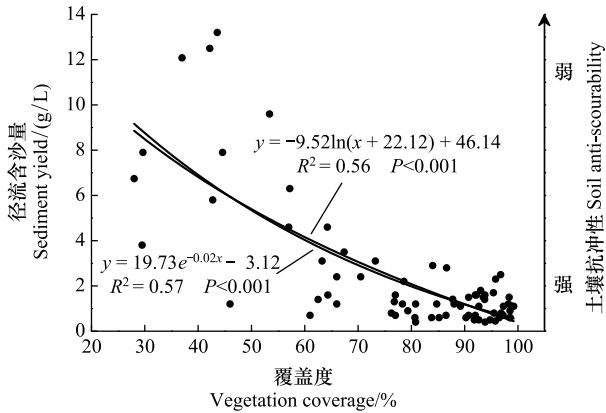


图3 植被覆盖度与土壤抗冲性的关系

Fig.3 The relation between soil anti-scourability and vegetation coverage

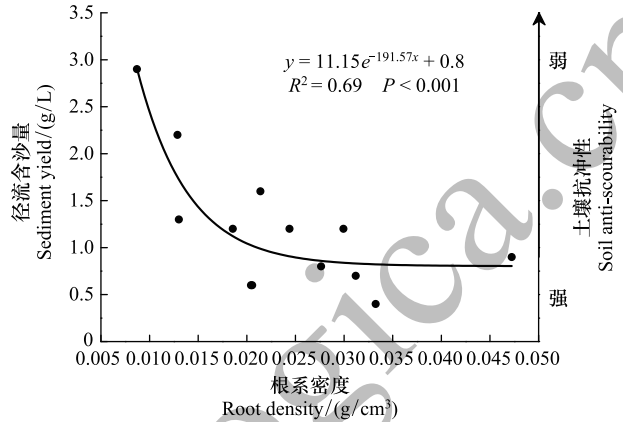


图4 根系密度与土壤抗冲性的关系

Fig.4 The relation between soil anti-scourability and root density

## 4 讨论

### 4.1 植被覆盖度和根系密度对土壤抗冲性的影响作用

植被在防治水土流失方面扮演着重要角色,主要表现为植被地上部分对降雨和径流的阻截作用以及地下部分对土壤的固持和改良作用两方面<sup>[21]</sup>,众多学者对此进行过广泛研究<sup>[22-23]</sup>。张素等<sup>[24]</sup>提出较高的植被覆盖度可增强土壤抵抗径流冲刷的能力;Durán-Zuazo 等<sup>[25]</sup>得出植被覆盖度与土壤侵蚀量和地表径流量呈显著负相关,较高的覆被率可明显降低降雨侵蚀;Nunes 等<sup>[26]</sup>得出植被覆盖度与土壤侵蚀之间呈显著的指数函数相关性;孙美佳等<sup>[27]</sup>研究表明植被覆盖度越高,坡面流流态越稳定,坡面产沙率越小。本文的研究结果与前人结论相符。植被覆盖度对土壤抗冲性的增强作用主要体现在植物的茎叶能对径流冲刷起到阻碍作用,减缓径流速度,从而抑止土壤侵蚀,所以植被越密集,土壤抗冲刷能力越强<sup>[28]</sup>。草地生态系统中植物的株高和冠幅小,较高的植被覆盖度往往代表着密集的植株,因此植被覆盖度对土壤抗冲性的影响作用显得尤为突出,提高植被覆盖度是增强草地生态系统土壤抗冲性的最有效手段。另外,植物茎叶对径流的阻碍作用也与茎的粗细以及植株的抗倒伏能力有关,根据 Gyssels 等<sup>[28]</sup>研究,粗矮的植物可能阻碍径流冲刷的作用更强,且本文研究得出土壤抗冲性与植被高度的相关性并不显著,这就导致了与植物高度密切相关的地上生物量对土壤抗冲性的影响显著性较低。

关于植物根系与土壤抗冲性关系的研究目前已有许多,大量研究表明,植物根系对土壤抗冲性有显著提高作用。宋坤等<sup>[29]</sup>研究发现草本植物根系生物量与土壤抗冲性呈显著正相关关系;李勇等<sup>[9]</sup>分析了植物固沙作用与根系密度的关系,表明固沙作用随着根系密度的增加呈现快-缓-极缓的增加趋势;Gyssels 等<sup>[28]</sup>研究得出土壤侵蚀强度与根系密度间呈指数增长形式。本文研究结果与前人结论相似。植物根系对土壤具有机械固持、改良土壤结构和改善土壤结构的功能,能有效抑制土壤侵蚀<sup>[20,30-35]</sup>。祁连山区的高寒草原和草甸植物根系发达,极大地固持住土壤并促进土壤改良,增强了土壤抗冲性,所以根系密度应作为研究祁连山区草地植被对土壤侵蚀的作用以及探索土壤侵蚀防治方法的一项重要因素。然而,植物根系对土壤抗冲性的作用不仅与根系密度有关,可能还与根系类型、根径、根表面积、根系分布等<sup>[32,36-37]</sup>因素有关,本文现只对根系密度进行了研究,未考虑其他根系因素,所以有待进一步补充完善。

## 4.2 其他因子对土壤抗冲性的影响作用

受青藏高原影响,祁连山呈现出典型的高寒生态系统特征,随着海拔的升高,土壤和植被的垂直分异特征明显<sup>[1]</sup>,而土壤质地和植被对土壤抗冲性有着显著的影响,因此与其他地区相比,海拔对土壤抗冲性的间接影响作用就较为明显。当海拔升高时,温度下降、蒸发量减少、降水量增大,植物可用水量增大,植被覆盖度和根系密度增大,对土壤的改良作用增强,并且海拔越高的地方,细碎土壤被强风侵蚀流失,土壤颗粒平均粒径越大,越不易被径流侵蚀,从而使得土壤抗冲性增强。另外,值得注意的是在极高海拔地区,如海拔 3500 m 以上的区域,可能由于低温、大风等恶劣气候影响,冻融侵蚀程度与地表径流侵蚀相比更加严重,因此高海拔地区需要开展关于土壤抗蚀性的冻融侵蚀研究。

土壤自身的特性对抗冲性也有较大影响,本文得出土壤抗冲性随着土壤砂粒体积分数的增加而增强,随着土壤粉粒体积分数的增加而减弱,与伏耀龙等<sup>[7]</sup>、李勇等<sup>[10]</sup>的研究结果相似。其原因可能是砂粒粒径大,在一定径流量下,不易被搬运侵蚀,而粉粒的粒径较小,稳固性较低,易被冲走。另一方面,本研究得出祁连山区土壤的砂粒粒径集中分布在 0.1—0.5 mm 之间,其含量越高,土壤的透水、通气性就越强<sup>[38]</sup>,能有效促进该区耐寒耐旱草地植被的生长,进而提高土壤抗冲性。

本研究得出坡度与土壤抗冲性间存在极显著相关性,土壤抗冲性随坡度的增大而减弱,但二者的相关系数较低,低于植被覆盖度、根系密度和土壤颗粒分布等因子,这与张建军、李阳芳、张建辉等人<sup>[6,36,39]</sup>的研究结果不尽相同。笔者推断这是因为祁连山区草地植被多属高寒草甸,草甸植物的根系发达,能在近地表结成一张密集的根系网络<sup>[40-41]</sup>,相比于晋西黄土区等地的植物,对土壤的影响作用更突出,使得径流含沙量对坡度变化的敏感度相对减弱,这也反映出祁连山区典型草地生态系统较强的抗侵蚀功能。

多样性是植被因素中的一项重要指标,众多研究表明,土壤抗冲性会随着物种多样性的增加而增强<sup>[25,42-44]</sup>,本文的研究结果与前人结论相似。当生物多样性增大时,由于植物种类增多,植被群落稳定性增强,具有不同叶片形态的植物种交错重叠分布,植被覆盖度增大,土壤抗冲性随之增强,所以生物多样性可能也在很大程度上通过植被覆盖度等植被因素影响土壤抗冲性。根据实地调查结果,在祁连山区,莎草科、豆科、毛茛科和蓼科植物,如高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等可有效提高土壤抗冲性。

## 4.3 问题与分析

根据通径分析得出,剩余项的通径系数约为 0.619,这表明实验存在一定误差或是存在其他对祁连山区草地生态系统的土壤抗冲性影响较大的因素在本次研究中未被考虑。根据前人研究可知,土壤抗冲性可能还受到土壤团聚体结构<sup>[39,45]</sup>、微生物、植物根径、根系分布<sup>[36,46]</sup>等因素的影响。另外,祁连山区草地地表大多有枯草残茬,这些残茬覆盖在地表,对径流冲刷也应有较强的阻缓作用。因此研究有待对其他可能因素进行调查,进一步完善结论。本研究采用实地放水冲刷法测定土壤抗冲性,该法最大程度地减少了土壤扰动,保证了径流冲刷过程与实际情况相似,但其缺陷在于实际操作较难控制,实际冲刷流量与设计流量仍有出入且难以稳定,存在试验误差。不过,本研究布设了大量调查样点,通过对大样本数据进行统计分析研究,可有效减少误差,在一定程度上弥补了实验操作中造成的精度损失。

## 5 结论

1) 祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性与海拔、坡度、植被覆盖度、地上生物量、根系密度、生物多样性和土壤质地均有密切关系。土壤抗冲性与海拔、植被覆盖度、根系密度和土壤砂粒体积分数呈极显著正相关( $P<0.01$ ),其中与植被覆盖度的相关性最强;与坡度和土壤粉粒体积分数呈极显著负相关( $P<0.01$ );与地上生物量和物种丰富度呈显著正相关( $P<0.05$ )。

2) 植被覆盖度和根系密度是影响祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性的关键因素。其中,植被覆盖度对土壤抗冲性的影响主要表现为强烈的直接作用,而根系密度对土壤抗冲性的直接作用相对较小,有较大

一部分影响表现为间接作用。植被覆盖度与径流含沙量间的关系可用对数和指数形式表达,根系密度与径流含沙量间的关系可用指数形式表达。

3)在祁连山区典型草地生态系统中,与海拔、坡度、地上生物量、植物多样性、土壤质地等影响因素相比,植被覆盖度和根系密度对土壤抗冲性的作用效果更明显。因此,在保护现有植被的基础上,通过人工播撒根系发达植物的种子扩大草场面积,提高植被覆盖度与根系密度,可有效防治水土流失。

#### 参考文献 (References):

- [1] 汤萃文, 张忠明, 肖笃宁, 杨国靖. 祁连山山羊河上游山区土壤侵蚀的环境因子特征分析. 冰川冻土, 2012, 34(1): 105-113.
- [2] 王海军, 张勃, 靳晓华, 张华, 柳景峰, 戴声佩. 基于 GIS 的祁连山区气温和降水的时空变化分析. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1196-1202.
- [3] 李巍, 毛文梁. 青藏高原东北缘生态脆弱区城镇体系空间结构研究——以甘南藏族自治州为例. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1427-1434.
- [4] 吴际通, 高华端, 秦晓娇, 刘学芳, 向万丽, 周涛. 黔中地区不同岩性区土壤抗冲性研究. 贵州农业科学, 2011, 39(5): 96-98.
- [5] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨. 水土保持学报, 1993, 7(1): 29-34.
- [6] 张建军, 张宝颖, 毕华兴, 李笑吟. 黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 25-29.
- [7] 伏耀龙, 张兴昌. 岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验. 农业机械学报, 2012, 43(7): 50-55.
- [8] 任乐, 张科利, 郭继成. 基于冲刷试验的贵州耕地土壤抗冲性研究. 水土保持学报, 2013, 27(1): 56-59.
- [9] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 植物根系与土壤抗冲性. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11-18.
- [10] 李勇, 朱显谟, 田积莹, 黄义端. 黄土高原土壤抗冲性机理初步研究. 科学通报, 1990, 35(5): 390-393.
- [11] 蔡甲冰, 刘钰, 许迪, 史宝成. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90.
- [12] 蔡甲冰, 许迪, 刘钰, 张宝忠. 冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析. 农业工程学报, 2011, 27(8): 69-76.
- [13] 刘广深, 徐冬梅, 许中坚, 王红宇, 刘维屏. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系. 土壤学报, 2003, 40(5): 756-762.
- [14] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.
- [15] 贺江舟, 龚明福, 范君华, 孙红专, 张利莉. 逐步回归及通径分析在主成分分析中的应用. 新疆农业科学, 2010, 47(3): 431-437.
- [16] 朱春晓. 基于 3S 技术的区域景观格局变化及驱动力研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
- [17] 田成明. 基于 Landsat-5 TM 影像的祁连山区蒸散发遥感估算——以祁连县为例[D]. 西宁: 青海师范大学, 2014.
- [18] 时盛博, 王连东, 雷有宏. 祁连县农牧业气候水分资源分析. 青海气象, 2010, (2): 19-24.
- [19] 张建军, 毕华兴, 茹豪, 李民义, 黄明, 郭宝妮, 王丹丹, 王春香. 坡面糙率及冲刷量的实验装置及其使用方法: 中国, 201110428174.4. 2015-05-20.
- [20] 李强, 刘国彬, 许明祥, 张正, 孙会. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153-159.
- [21] 茹豪, 张建军, 黄明, 梁伟. 晋西黄土区不同地类土壤抗冲性分析. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 6-11.
- [22] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 植被与水土流失关系研究进展. 生态学报, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [23] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌, 卢宗凡. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响. 生态学报, 2000, 20(6): 1038-1044.
- [24] 张素, 熊东红, 苏正安, 董一帆, 郑学用, 张宝军, 李首成. 土壤抗冲性及其影响因素研究进展. 世界科技研究与发展, 2014, 36(6): 721-725.
- [25] Durán-Zuazo V H, Francia-Martínez J R, García-Tejero I, Távira S C. Implications of land-cover types for soil erosion on semiarid mountain slopes: Towards sustainable land use in problematic landscapes. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 272-281.
- [26] Nunes A N, de Almeida A C, Coelho C O A. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. Applied Geography, 2011, 31(2): 687-699.
- [27] 孙佳美, 余新晓, 樊登星, 梁洪儒, 常玉, 李瀚之. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响. 生态学报, 2015, 35(8): 2574-2580.
- [28] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(4): 371-384.
- [29] 宋坤, 潘晓星, 穆立蕾. 6 种草本植物根系土壤抗冲性. 国土与自然资源研究, 2013, (3): 82-83.
- [30] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil Science, 1981, 132(6): 427-435.
- [31] Tengbeh G T. The effect of grass roots on shear strength variations with moisture content. Soil Technology, 1993, 6(3): 387-295.
- [32] 沈晶玉, 周心澄, 张伟华, 李文忠, 李永良. 祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 87-91.
- [33] Reid J B, Goss M J. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. Journal of Soil Science, 1981, 32

(4): 521-541.

- [34] Hartman R, De Boodt M. The influence of the moisture content, texture and organic matter on the aggregation of sandy and loamy soils. *Geoderma*, 1974, 11(1): 53-62.
- [35] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 周正朝, 上官周平. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程. *生态学报*, 2010, 30(9): 2387-2396.
- [36] 李阳芳, 宋维峰, 彭永刚, 李健. 元阳梯田不同土地利用类型表层土壤的抗冲性. *中国水土保持科学*, 2012, 10(5): 31-35.
- [37] 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 刘志鹏, 彭石磊. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能. *生态学报*, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [38] 高传友, 赵清贺, 刘倩. 北江干流河岸带不同植被类型土壤粒径分形特征. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 37-42.
- [39] 张建辉, 刘刚才, 倪师军, 朱波, 葛方龙. 紫色土不同土地利用条件下的土壤抗冲性研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2003, 33(S): 61-68.
- [40] Preston N J, Crozier M J. Resistance to shallow landslide failure through root-derived cohesion in East Coast Hill Country soils, North Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(8): 665-675.
- [41] Prosser I P, Dietrich W E, Stevenson J. Flow resistance and sediment transport by concentrated overland flow in a grassland valley. *Geomorphology*, 1995, 13(1/4): 71-86.
- [42] Beierkuhnlein C, Jentsch A. Ecological importance of species diversity//Henry R J, ed. *Plant Diversity and Evolution: Genotypic and Phenotypic Variation in Higher Plants*. Wallingford, UK: CAB International, 2005: 249-285.
- [43] Power J F, Follett R F. Monocultures: advantages, limitations, and alternatives. *Scientific America*, 1987, 256(3): 78-86.
- [44] 王丹丹, 张建军, 茹豪, 黄明, 李民义, 王春香. 晋西黄土高原不同地类土壤抗冲性研究. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 28-32, 38.
- [45] 陈安强, 张丹, 熊东红, 刘刚才. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 108-113.
- [46] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. *生态学报*, 2006, 26(10): 3270-3275.