

坡面尺度上地貌对 α 生物多样性的影响

郑江坤¹, 魏天兴^{1*}, 郑路坤², 大林直¹, 陈致富¹, 赵健¹, 朱文德¹, 孙慧¹

1. 北京林业大学水土保持学院//水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 上海财经大学应用数学系, 上海 200433

摘要: 为了解地貌在坡面尺度上对 α 生物多样性的影响, 采用主观采样法在陕北吴起县合家沟流域不同地貌部位进行了样地调查。利用 SPSS16.0 统计软件先后对各地貌部位物种组成及各物种的重要值、地形因子要素间、地形因子和群落 α 多样性之间分别做了聚类分析、相关分析和多元回归分析。结果表明: (1) 地貌部位相似的群落聚类在一起, 说明地形因子是影响物种组成、群落结构、生态系统等重要因素。(2) 海拔和坡位, 坡向和坡度, 地形指数和海拔、坡位、坡形之间的 Pearson 相关系数均大于 0.8, 双尾显著性检验概率小于 0.05。(3) 影响 α 生物多样性指标香农-维纳指数的地形因子按重要性从大到小依次是: 坡位、坡向、海拔、坡形、坡度、地形指数, 进一步分析得出在黄土高原丘陵沟壑区, 沟沿线、光照、土壤水分和养分在影响 α 生物多样性指标上依次递减。(4) 通过多元线性回归检验, 得出坡位、坡向、坡形、海拔这四个地形因子与群落 α 生物多样性关系密切, 建立的回归模型显著性检验可信度大, 与样本数据的拟合度高。各地形因子数据归一处理后的回归方程为: 香农-维纳指数 = $2.417 - 0.581 \times \text{坡形} - 1.333 \times \text{坡位} + 1.449 \times \text{海拔} + 0.631 \times \text{坡向}$ 。地形地貌特征在黄土丘陵区表现明显, 研究它对生物多样性的影响可为该区植被恢复提供参考, 但由于调查样地尺度较小, 在应用推广上尚待进一步研究。

关键词: 地形因子; 香农-维纳指数; 多元回归分析; 黄土高原丘陵沟壑区

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2254-06

一个区域的生物多样性的形成与发展具有等级性的多重机制^[1]。植物的分布和区系形成是历史、地理、进化和生态诸方面的机制共同作用的结果。这同样适合于对生物多样性格局成因的探讨。

尽管关于生物多样性的空间格局已有多种模式和解释性假说^[2], 其中海拔梯度格局被认为是一种与纬度梯度相关的生物多样性格局模式。但对这些假设的验证还很不足, 甚至这些格局模式本身还很模糊; 对其定量研究要受到空间定位、取样尺度和样本量等方面的影响, 生态系统的复杂结构也带来很多困难。国内这方面的研究较少, 而关于北京东灵山生物多样性的研究涉及了山地植被 α 、 β 多样性的空间格局及其与群落结构、海拔梯度和空间尺度的关系, 是国内这方面的代表性研究^[3-4]。奚为民等^[5]对河北雾灵山也做了 α 多样性的海拔梯度研究, 提出生物多样性在海拔 1600 m 下随高度的增加而增加, 超过 1600 m 后生物多样性随海拔的增加而减少。

物种多样性受经纬度、海拔、坡向、土壤、地形以及群落所处演替阶段等因素影响。对于一个小范围的植物群落来说, 小生境的差异可能是重要的影响因子。关于生态因子对多样性的影响方面, 目前还没有一致的结论。有的认为较高的物种多样性一般出现在土壤养分梯度的中间位置^[6], 也有的认

为土壤最肥沃的地方群落的物种多样性最高^[7]。地形对多样性影响也同样存在较大的分歧, 有的认为地形与植物物种多样性关系不密切^[8], 也有的认为地形与多样性关系密切^[9]。生物多样性的空间格局及其环境解释仍是一个有待深入的问题。

群落物种多样性的变化规律以及与环境因子的关系已有一些研究, 研究主要集中在人工植被恢复方面^[10], 对植被的自然恢复研究较少。黄土沟壑区是我国西部的生态脆弱带, 是研究生物多样性的关键地区之一。其不同地貌部位的植物物种分布、植物群落的生物多样性特征、以及水土保持功能与效益评价等方面已有许多研究^[11-13]。对本区域坡面尺度的生物多样性的空间格局, 以及生物多样性与地形因子的相关分析的生态机制等问题尚未被涉及。本文以陕北吴起县自然恢复区为对象, 从坡面尺度分析生物多样性的空间格局及其受地形异质性的影响, 探讨黄土沟壑区的空间格局的生态学机制。

1 研究区概况

吴起县位于延安市西北部, 地处毛乌素沙地南缘农牧过渡地带, 属黄土高原丘陵沟壑区, 地跨东经 $107^{\circ}38'57''$ 至 $108^{\circ}32'49''$, 北纬 $36^{\circ}33'33''$ 至 $37^{\circ}24'27''$ 。海拔 1233 ~ 1809 m, 县境内有无定河、北洛河两大流域, 白于山、子午岭两大山系。全县面积 3791.5 km², 水土流失面积 3693 km²。占全县

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD03A1206)

作者简介: 郑江坤 (1976 年生), 男, 博士研究生, 主要从事水土保持与水文生态过程方向的研究。E-mail: kjs10129@163.com

*通讯作者: 魏天兴 (1969 年生), 男, 副教授, 研究方向为防护林学与森林生态效益监测与评价。E-mail: weitx@bifu.edu.cn

收稿日期: 2009-10-12

总面积的97.4%,属极强度水土流失区。气候属半干旱温带大陆性季风气候,年平均气温7.8℃,无霜期96~146 d,年平均降雨量478.3 mm,且64%以上集中在7~9月份,其它季节多为无效降雨,平均年陆面蒸发量为400~450 mm,属典型干旱半干旱地区^[14]。

调查研究区位于吴起县杨青流域合家沟,南北走向,沟的两侧坡向分别为半阴坡、半阳坡。合家沟从1988年进行封育,属于植被自然恢复区,植被类型为草原植被,土壤主要是黄绵土,海拔1330~1589 m,调查的面积为56.47 hm²。

2 研究方法

2.1 调查方法

从梁(崮)顶到沟底,以沟沿线为界把研究区分成四种地貌类型,分别是梁(崮)顶、梁(崮)坡、沟坡、沟底。考虑到坡向的影响,采用主观采样法沿沟的一侧的梁(崮)顶到另一侧的梁(崮)顶共取三条线,分别记为线I、线II、线III;每条线取7个20 m×20 m的样地,都在沟的横切面上,地貌部位分别位于梁(崮)顶、梁(崮)坡、沟坡、沟底、沟坡、梁(崮)坡、梁(崮)顶,形状呈“V”字状,样地号从东到西依次记为1、2、3、4、5、6、7。由于合家沟流域均是草本植被,故只在每个样地中随机取4个1 m×1 m的草本样方,共计84个草本样方。从2008年7月14日到2008年8月17日,我们对其进行了调查,每个草本样方中分别调查植物种类、每种植物的平均高度、盖度、株(丛)数、生长状况和分布状况;平均高度采用最高的三株和最低的三株来求平均,盖度用自制的草本盖度测量仪来进行测量,生长状况分为良、中、差三等,分布状况分为均匀、丛生、随机三类。

2.2 测定分析方法

2.2.1 重要值的计算

重要值是以综合数值表示植物物种在群落中的相对重要性。其计算公式如下^[15]:

灌木和草本的重要值 = 相对高度 + 相对频度 + 相对盖度

2.2.2 生物多样性的测定

多样性分析的数据通过植被样方调查获得。 α 多样性指数是物种丰富度和均匀度的综合反映。本文利用Shannon-Wiener指数^[15]作为 α 生物多样性的指标:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i, P_i = \frac{N_i}{N}$$

式中: H' 为Shannon-Wiener指数, S 为群落中的物种数, P_i 为第*i*个种的相对多度, N_i 为第*i*个

种个体数, N 为群落全部个体总数。

2.2.3 地形因子的测定

为了反映环境梯度和空间尺度对物种多样性分布的影响,主要考虑地形特征来表示群落环境因子,采用海拔、坡度、坡向、坡位、坡形和地形指数共6个变量加以反映。

在样方植被调查时,同时记录样方所在样地的地形特征,包括坡度、坡向、坡位、坡形、海拔等。海拔用GPS实测,多次测量求平均值;坡度由经纬仪实测,都以正值计算;坡向用罗盘实测,坡向数据分为8级,以北向为1、东北为2、西北为3、东向为4、西向为5、东南为6、西南为7、南向为8,数字越大,表示越向阳,越干热;坡位从沟底到梁(崮)顶以沟沿线为界分为4级,依次赋值1~4;坡形分凹、平凹、平、平凸、凸5级,依次赋值1~5;地形指数是坡形值和坡位值之和。采用公式: $D_i' = (D_i - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{Min})$ 对全部地形因子指数做归一化处理,得到0~1的区间值。

2.2.4 生物量及各土壤物理性质的测定

草本样方调查完后,在确定的1 m×1 m样方上采用“收获样方法”分别测定草本的地上、地下部分鲜重、干重^[16],上下部分的干重相加即得该样方的生物量,以同样的方法测定相同地貌部位的其他11个生物量,然后求取平均值,即为该地貌部位的生物量。土壤含水率、土壤容重、土壤毛管孔隙度分别采用分层取土烘干法、环刀法、圆筒渗透法测定,测量深度1 m,分成0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 5层,然后对各层土壤的值进行加和平均^[17]。

2.2.5 多元统计方法

以相同地貌部位的3个样地(12个样方)做为一个生物群落进行统计分析、分别计算出每一群落中各种植物的重要值。

利用SPSS16.0统计软件对七个地貌部位之间植物重要值进行聚类分析,根据调查情况,参考以往的聚类方法,本文采用皮尔逊相关系数,聚类运算方法上用组间平均联结法^[18],最后,由相似矩阵导出树状图。同样用皮尔逊相关系数对七个地貌部位的地形因子进行相关分析,最后利用向后剔除法对6个地形因子和香农指数之间进行了多元回归分析。

3 结果与分析

3.1 聚类分析

根据地貌部位共分成七个群落,从东到西分别记为:1、2、3、4、5、6和7。计算每个群落中各个植物种的重要值,列成植物种×群落号矩阵,共调查植物种57种,即形成57行×7列的矩阵(见文末附表),按列进行聚类分析。

各地貌类型中, 梁坡和沟坡无论海拔、坡度、坡位等地形因子, 还是土壤因子、小气候因子等都比较接近, 故而形成的物种重要值组成、多样性特征等也较接近, 如图 1 上的地貌号 2 和 3、5 和 6。

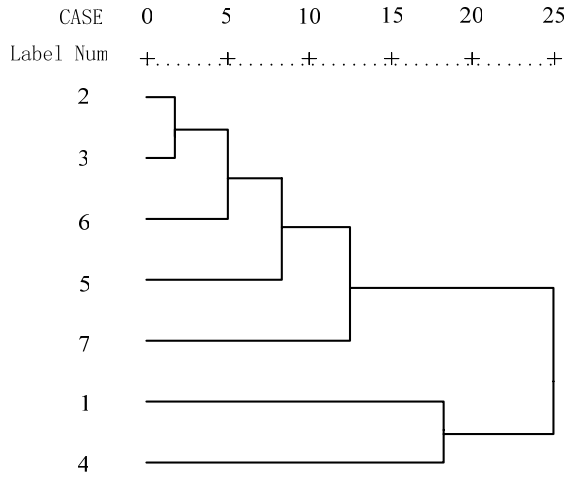


图1 合家沟各地貌部位之间的树状图
Fig.1 Dendrogram between parts of the landform in Hejiagou

梁顶间、梁顶和沟底之间比较接近, 如图 1 上的地貌号 1 和 4、7; 这说明不同的地貌格局对植被的分布组成有重要的影响, 也表明相似地貌部位间存在内在的联系, 2、3 和 5 之间的相似系数最大, 均在 0.8 以上; 2、3 和 6 之间的相似系数其次, 在 0.7 以上; 1 和 4, 6、7 和 1、5, 5、7 和 3 之间都大于 0.6; 其它的相似系数均小于 0.6; 说明它们之间的关系不紧密, 受到各自的影响较小。

对照表 1 发现, 这种相似关系也体现在坡向、坡度、海拔、坡位、含水率和土壤容重之间的相似

关系。例如: 含水率 2、3 和 6 相同, 都为 18%, 1 和 7 相同为 20%, 5 为 19%, 4 为 21%。这正好和树状图结构基本相同。其他的因素也同样和树状图有比较大的相关性。这充分说明这些因素直接影响着该地区的物种多样性、生态特征等。

3.2 相关分析

坡向、坡度、海拔等地形因子影响光照、土壤水分和养分等的空间分布, 从而影响植被的空间格局, 下面对六个地形因子进行相关分析, 使用双尾检验系数来检验实际显著性概率, 即使零的假设成立的概率。实际显著度用“*”、“**”表示。

结果表明: 坡度和坡向, 海拔和坡位, 地形指数和海拔、坡位、坡形之间的 Pearson 相关系数较大, 其中, 坡度和坡向, 坡形和地形指数的相关系数均大于 0.9, 双尾显著性检验概率均小于 0.01; 海拔、坡位和地形指数相互之间相关系数大于 0.8, 双尾显著性检验概率小于 0.05, 说明它们之间关系十分密切。海拔和坡形之间相关系数大于 0.7, 双尾显著性检验概率为 0.077, 说明这两者间也有一定的相关性; 其它因子间相关系数都小于 0.6, 有很多表现出负相关, 则说明之间的相关性较差 (表 2)。

表 2 合家沟各地形因子间的相关系数
Table 2 Correlation coefficient between terrain factors in Hejiagou

相关系数	坡向	坡度	海拔	坡位	坡形
坡度	0.932**				
海拔	-0.308	-0.287			
坡位	-0.235	-0.117	0.853*		
坡形	-0.204	-0.165	0.704	0.578	
地形指数	-0.242	-0.164	0.854*	0.833*	0.933**

*实际显著性概率<0.05; **实际显著性概率<0.01。

表 1 合家沟不同地貌部位之间各环境因素的对比

Table 1 Comparison of the various environmental factors among different parts of the landforms in Hejiagou

地貌号	土壤含水率/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	生物量/(g·m ⁻²)	平均盖度/%	坡向	坡度/(°)	海拔/m	坡位	坡形	地形指数
1	20	1.30	0.50	640.30	78.00	1	10	1432.83	4	4	8
2	18	1.25	0.52	547.30	74.58	5	33	1392.75	3	5	8
3	18	1.19	0.44	1224.30	80.58	5	25	1352.83	2	1	3
4	21	1.40	0.40	1810.20	95.92	1	2	1342.83	1	3	4
5	19	1.23	0.50	654.90	82.17	4	31	1352.25	2	1	3
6	18	1.25	0.50	282.40	67.42	4	23	1468.83	3	5	8
7	0.20	1.27	0.51	553.9	79.75	1	3	1484.42	4	4	8

3.3 多元回归分析

香农-维纳指数是 α 生物多样性测量的一种指标, 主要用于测量物种在该群落中分布的均匀程度。通过对比发现: 该值在各地貌部位的值是不均一的, 地貌部位 3 处的香农-维纳指数最大, 1 处值最小, 其他部位相差不大 (如图 2), 这种随地貌位

置高低起伏的变化内部到底存在什么规律, 这种变化与地形因子之间有怎样的相关关系。我们据此首先对地形因子进行归一化处理, 然后利用向后剔除法对 6 个地形因子和香农指数之间进行了多元回归分析 (表 3), 得出影响香农指数的地形因子按重要性排序如下: 坡位>坡向>海拔>坡形>坡度; 暗示了

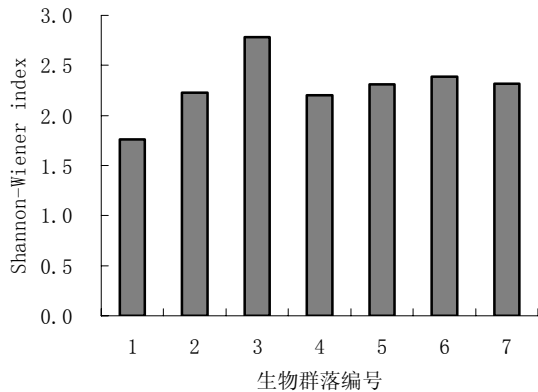


图2 合家沟不同地貌部位生物群落间的香农指数

Fig.2 Shannon index of different parts of the landforms in Hejiagou

表3 向后剔除法回归模型摘要

Table 3 Regression model summary by way of backward elimination

模型	复相关系数	判定系数	调整判定系数	估计值的标准误
a	0.943	0.889	0.335	0.244
b	0.937	0.877	0.631	0.182
c	0.742	0.551	0.101	0.284
d	0.549	0.301	-0.048	0.306
e	0.427	0.183	0.019	0.297
f	0.000	0.000	0.000	0.299

各模型下方程变量重要性排序如下：a 坡位，坡向，海拔，坡形，坡度；b 坡位，坡向，海拔，坡形；c 坡位，坡向，海拔；d 坡位，坡向；e 坡位。

坡面尺度地形因子对 α 生物多样性格局的影响情况。地形指数是坡位值和坡形值的线性组合，故在回归分析中被排除。由排序可知。

坡位是影响该地区 α 生物多样性最重要的地形因子，这主要是由于在黄土高原梁状丘陵沟壑区，地貌形态尽管在空间上多表现为较大的复杂性与多样性。但是，从总体形态上可以分为正地形的沟间地和负地形的沟谷地，这是黄土地貌区别于其它地貌类型的最基本特征。在沟间地和沟谷地不同的地貌部位，地形地貌特征、土壤侵蚀的方式以及土地利用方式都有着明显的差异^[19]；两者分界线即为沟沿线；而坡位是以沟沿线作为基准线划分的，所以说坡位在相当程度上揭示了黄土地貌的空间变异态势，不同坡位之间在土壤、水分、养分、光照、风速以及土壤侵蚀等各方面存在很大差异；进而影响不同坡位植物的生长状况、分布格局，从而影响到 α 生物多样性。

坡向直接影响林地的光照，从而影响生物的光合作用，进而影响生物多样性指标。故坡向成为仅次于坡位的重要影响因子。海拔作为第三大影响因子，主要是由于海拔和坡位之间有较强的正相关。坡形很大程度地影响着与生物生长密切相关的立地

的土壤肥力和养分的分布，也同样间接影响着 α 生物多样性。坡度影响很小，这可能是由于小于 45° 的坡度对立地土壤肥力的影响十分有限，对其他生态因子的影响也十分有限。地形因子就是通过对土壤肥力、养分和光照等的影响进而影响 α 生物多样性。

在坡面尺度上发生变化的地形因子强烈影响物种多样性的空间格局差异。即从沟底到梁（崮）顶，水分、光照及温度条件存在明显差异，发育了不同结构和组成的植物群落，由此导致了物种多样性的差异。

比较各模型的拟合情况，a 模型的复相关系数最大，为 0.943，而调整判定系数则明显小于 b 模型，说明作用不显著的变量被引入方程，通过对比分析得：坡度作用不显著。同时估计值的标准误 b 最小为 0.182，综上 b 模型为最佳（表 3）。

对 b 模型 4 个因子和香农指数之间进行回归分析，表 4 显示了该模型的偏回归系数、标准误、常数、标准化偏回归系数和回归系数假设检验的 t 值和 P 值。经 t 检验，P 值分别是 0.004、0.148、0.101、0.100、0.109，按 $\alpha = 0.15$ 水平，均有显著性意义。得出回归方程如下：香农-维纳指数 = $2.417 - 0.581 \times \text{坡形} - 1.333 \times \text{坡位} + 1.449 \times \text{海拔} + 0.631 \times \text{坡向}$ （表 4）。

表4 多元回归系数及显著性检验

Table 4 Multiple regression coefficient and significance test

模型	偏回归系数	标准误	标准化系数	T 检验值	显著性程度
常数	2.475	0.165		15.035	0.004
坡形系数	-0.581	0.252	-0.825	-2.305	0.148
坡位系数	-1.333	0.459	-1.653	-2.905	0.101
海拔系数	1.449	0.498	2.003	2.912	0.100
坡向系数	0.631	0.228	0.871	2.773	0.109

4 结论与讨论

聚类分析表明各地貌部位的群落间物种分布存在内在联系，这种内在联系也体现在相应地貌部位土壤含水率、坡向、坡度、坡位、海拔和土壤容重之间。坡位、坡度、坡向和海拔等地形因子反映的局部生境光、热、水分条件综合地影响着植被的水平和垂直分布。各地形因子之间也相互影响，通过相关分析表明：坡向和坡度、海拔和坡位、坡形和地形指数之间有很大的相关性；其它因子间相关系数较小则表明相关性较差。

分析区域内地形因子对 α 生物多样性空间格局影响的顺序由大到小为：坡位、坡向、海拔、坡形和坡度。表明在黄土高原丘陵沟壑区，沟沿线对植物生长分布起关键的作用，其次光照条件对 α 生物多样性作用也很重要，土壤水分、养分等对生物多样性也起到一定的作用，而坡度对生物多样性空间

格局影响甚微。

由于光照、热量、土壤养分和水分等条件都受到地形格局的影响,并且具有方向不同的分布梯度,彼此交错而又有叠加作用,所以物种多样性的格局反映出多尺度、多成因的特征。再加上各地貌部位之间的相互作用,使得群落表现出复杂的多样性空间分布格局。本文仅从坡面尺度范围内对黄土高原丘陵沟壑区自然恢复流域植被空间分布格局、地形因子和群落 α 多样性之间进行了初步研究,但调查范围较小,没有重复调查来验证,尚需进行更加深入的研究。

致谢: 本文的植物种鉴别工作得到北京林业大学生物学院林秦文博士的指导,同时野外调查工作得到了吴起县退耕办刘广亮主任的大力支持。

参考文献:

- [1] COMELL H V, LAWTON J H. Species interactions, local and regional processes and limits to the richness of ecological communities: a theoretical perspective[J]. *Animal Ecol*, 1992, 61: 1-12.
- [2] HUSTON M A. Biological diversity the coexistence of species on changing landscapes[J]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 56-68.
- [3] 刘灿然, 马克平, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究IV. 样本大小对多样性测度的影响[J]. *生态学报*, 1997, 17(6): 584-592.
LIU Canran, MA Keping, YU Shunli, et al. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: IV. Effect of sample size on diversity measures[J]. *Acta Ecol Sin*, 1997, 17(6): 584-592.
- [4] 马克明, 叶万辉, 桑卫国, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究 X. 不同尺度下群落样带的 β 多样性及分形分析[J]. *生态学报*, 1997, 17(6): 626-634.
MA Keming, YE Wanhui, SANG Weiguo, et al. Study on plant community in Dongling Mountain. X. β diversity and fractal analysis on transect on different scales[J]. *Acta Ecol Sin*, 1997, 17(6): 626-634.
- [5] 奚为民. 雾灵山自然保护区森林群落物种多样性研究[J]. *生物多样性*, 1997, (5): 121-125.
XI Weimin. Study on species diversity of forest in Wuling Mountain National Reserve[J]. *Chin Biodiver*, 1997, 5(2): 121-125.
- [6] 胡建忠, 郑佳丽, 张春霞. 黄河上游退耕地植被组成、结构及水土保持功能评价[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 42-50.
HU Jianzhong, ZHENG Jialin, ZHANG Chunxia. Evaluation to composing structure and function for soil and water conservation of vegetation in rehabilitated lands in upper reach of the Yellow River[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 42-50.
- [7] 冶民生, 关文彬, 白占雄, 等. 岷江干旱河谷植物群落生态梯度分析[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 70-75.
YE Minsheng, GUAN Winbin, BAI Zhanxiong, et al. Ecological gradient of plant community in the dry valley of Minjiang River[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 70-75.
- [8] 曾祥福, 黄闰泉, 葛正明, 等. 三峡库区农林复合生态系统植物物种多样性指数[J]. *湖北林业科技*, 1998, 2(104): 1-4.
ZENG Xiangfu, HUANG Runquan, GE Zhengming, et al. Study on plantation species diversity index of agroforestry ecosystem in three Gorge Reservoir area[J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 1998, 2(104): 1-4.
- [9] 刘美珍, 蒋高明, 李永庚, 等. 浑善达克退化沙地草地生态恢复试验研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(12): 2720-2727.
LIU Meizhen, JIANG Gaoming, LI Yonggen, et al. An experimental and demonstrational study on restoration of degraded ecosystems in Hunshandak Sandland[J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, 23(12): 2720-2727.
- [10] 赵勇, 樊巍, 叶永忠, 等. 太行山低山丘陵区不同植物群落物种多样性研究[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(3): 64-71.
ZHAO Yong, FAN Wei, YE Yongzhong, et al. Analysis of species diversity of difference plant communities in hilly region of Taihang mountain[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(3): 64-71.
- [11] 胡相明, 程积民, 万惠娥, 等. 黄土丘陵区地形、土壤水分与草地的景观格局[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3276-3285.
HU Xiangming, CHENG Jimin, WAN Huie, et al. Reciprocal relationships between topography, soil moisture and native vegetation patterns in the loess hilly region, China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(10): 3276-3285.
- [12] 汤孟平, 周国模, 施拥军, 等. 不同地形条件下群落物种多样性与胸高断面积的差异分析[J]. *林业科学*, 2007, 43(6): 81-85.
TANG Mengping, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, et al. Difference analysis of community biodiversity and basal area under different terrain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(6), 81-85.
- [13] 沈泽昊, 赵俊. 基于植物-地形关系的物种丰富度空间格局预测-GAMs 途径的一种应用[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 953-963.
CHEN Zehao, ZHAO Jun. Prediction of the spatial patterns of species richness based on the plant-topography relationship: An application of GAMs approach[J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(3): 953-963.
- [14] 赖亚飞, 朱清科, 张宇清, 等. 吴旗县退耕还林生态效益价值评估[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 47-51.
LAI Yafei, ZHU Qingke, ZHANG Yuqing, et al. Valuing ecological effects of land conversion project in Wuqi County[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 47-51.
- [15] 姜安如, 牛翠娟. 基础生态学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
LOU Anru, NIU Cuijuan. *Experimental Ecology-based Guidance*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [16] 张晓娟, 魏天兴, 荆丽波, 等. 晋西北天然次生林营养元素分配与积累研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(3): 84-89.
ZHANG Xiaojuan, WEI Tianxing, JING Libo, et al. Nutrient distribution and accumulation patterns of natural secondary forests on the Loess Plateau of Shanxi Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(3): 84-89.
- [17] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
LIN Dayi. *Agrology Experimental Guidance*[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2004.
- [18] 付必谦. 生态学实验原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 227-242.
FU Biqian. *Principles and Methods of Ecology Experimental*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 227-242.
- [19] 梁广林, 陈浩, 蔡强国, 等. 黄土高原现代地貌侵蚀演化研究进展[J]. *水土保持研究*, 2004, 4(11): 131-137.
LIANG Guanglin, CHEN Hao, CAI Qiangguo, et al. Research progress of modern topographic evolution and landform erosion in Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 4(11): 131-137.

Effects of landforms on α biodiversity in slope scale

ZHENG Jiangkun¹, WEI Tianxing¹, ZHENG Lukun², DALIN Zhi¹,
CHEN Zhifu¹, ZHAO Jian¹, ZHU Wende¹, SUN Hui¹

1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education//
Soil and Water Conservation Academy, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Department of Applied Mathematics, Shanghai University of Finance and economics, Shanghai 200433, China

