

高速公路路域边坡人工植被下土壤质量的变化

余海龙^{1,2}, 顾卫², 殷秀琴³, 卜崇峰⁴

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875; 3. 东北师范大学 城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024; 4. 中国科学院 水利部 水土保持研究所工程中心, 陕西 杨凌 750021)

摘要: 在呼集高速公路卓资段路堑边坡, 从 2003 和 2004 年开始建立人工植被。2005 年在 2 个不同种植年龄和同种植被类型的样地内采集土样, 分析了土壤的物理性状变化、养分变化和生物活性。人工植被建立对土壤理化性状改良和成土发育产生了深刻的影响, 并随着植被建立时间的延长而逐渐增大。同时由于受到不同植被类型和人为措施的影响, 使得相同种植时间的不同样地, 土壤性质的变化有差异。综合考虑了土壤物理、化学和生物因子, 建立了土壤质量综合评价指标体系, 并利用多元统计方法, 对人工植被建立过程中土壤质量的变化进行了综合评价。研究表明, 有人工植被边坡土壤质量明显高于自然恢复边坡和新挖裸露边坡, 土壤质量增长显著。由于边坡植被尚未形成稳定群落, 以及人工管护的力度差异, 土壤质量变化随时间有所起伏, 表现为种草 2 a 的边坡土壤质量明显优于种草 3 a 的边坡。

关键词: 人工植被; 成土变化; 土壤质量; 综合评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)06-0032-05

中图分类号: S151

Changes of Soil Quality on Expressway Side Slope as Impacted by Artificial Vegetation

YU Hai-long^{1,2}, GU Wei^{1,2}, YIN Xiu-qin³, BU Chong-feng⁴

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. College of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Urban

Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China; 4. Engineering Center,

Institute of Soil Erosion and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Artificial vegetation was set up on the slope in the Zhuozi County section of Hohhot - Jining expressway in 2003 and 2004. By contrast to bare slope, soil properties have changed remarkably and have increased with plantation time. A comprehensive evaluation index system for soil quality based on soil physical, chemical, and biological properties is established. Based on the system method and multivariate statistics, the changes of soil quality during soil formation on expressway slope are evaluated. The work is expected to reveal the changes of soil quality and the coupling relationship between vegetation and soil. Using SPSS analysis software, the membership function value, component capacity, and weights of soil quality factors by PCA are calculated and then the SQI (soil quality index) values for all plots are calculated. Results show that soil quality has increased since artificial vegetation was set up. The SQI values indicate that soil quality does not change with the time of artificial vegetation extending. Because management measures are different annually and artificial vegetation does not form a steady community, the SQI value for 2-year plantation plot is higher than that for 3-year plot. Among all plots, the highest SQI value is 0.649, which is distinctly higher than other plots.

Keywords: artificial vegetation; soil formation evolution; soil quality; comprehensive evaluation

伴随公路的修筑,公路沿线形成了生态扰动带(包括施工扰动带和运营扰动带)。公路路基土方工程产生了新的坡面,即路堑边坡和路堤边坡。路堑边坡是

由机械切割挖掘所成,表层土壤、植被被搬离原地,仅存的是岩石和土状物,而且土状物很少。路堤边坡则多数是由工程渣土进行回填碾压所成,所以土体组成

收稿日期:2008-05-15

修回日期:2008-06-27

资助项目:交通部西部交通建设科技项目“公路路域生态工程技术研究”(200331822333); 内蒙古科技厅科技项目“内蒙古中部干旱地区公路边坡生态恢复技术应用研究”(NJ-2005-36)

作者简介:余海龙(1979—),男(汉族),博士,讲师,主要研究方向为公路路域生态恢复与重建技术。E-mail:yhl@nxu.edu.cn。

通信作者:顾卫(1956—),男(汉族),博士,教授,博导,主要研究方向为边坡生态恢复技术与自然资源。E-mail:weigu@bnu.edu.cn。

复杂,无原始植被。由于受风、雨侵蚀,公路坡面物质极不稳定,生物过程极其微弱。在高陡边坡上,因为自然风化产生的土壤不容易在原地留存,造成坡面土壤的原生演替特别缓慢。但在边坡上建立人工植被,坡面残留物质得以固定,生物作用促使岩石风化物 and 母质开始成土发育,就会促进坡面残留物质不断向着土壤形成的方向演变。同时,土壤是植物生长的主要环境因子之一,植被建立过程,也是植物与土壤相互影响和相互作用的过程,在这个过程中作为土壤本质特征的土壤肥力处于不断地发展变化中^[1]。土壤质量水平直接影响到边坡植被恢复的后期效果^[2],但目前对边坡土壤质量的变化和营养循环、水分循环等方面还是缺乏系统研究。因此,本文以位于呼——集高速公路卓资段六苏木乡的路堑边坡为研究样地(2003年实施人工植被恢复工程),依据植被建立过程中土壤物理、化学和生物性质研究的基础,运用综合评价方法,对不同种植时间的高速公路路前边坡绿地土壤质量进行多因子综合比较,分析在边坡上植被建立与土壤质量的关系,为今后开展高速公路路域边坡生态系统演替的机理研究打下基础,同时,也为人类研究退化生态系统的恢复和重建提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区自然环境条件

研究区位于内蒙古自治区中部卓资县六苏木乡(40°52'N, 112.34'E),是个多山、多丘陵、少平川地区。该地区属温带半干旱气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润。全县平均海拔 1 750 m。年均气温 2.9℃,年平均降水量 544.5 mm,其中大约 70%集中在 6—8 月。土壤类型主要有灰褐土、栗钙土、栗褐土、草甸土、盐土、沼泽土 6 个土类。代表性植物有针茅(*Stipa capillata* Linn)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、黄蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. Et Kit.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)、冰草[*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.]、百里香(*Thymus vulgaris*)、老芒麦(*Elymus sibiricus* Linn)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn)以及胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz)等。优势种为针茅和百里香等。

1.2 实验设计

选取研究内 110 国道和呼集高速公路的典型坡面作为研究区域。选择不同时间种植的人工植被作为研究对象,以自然恢复和裸露边坡为对照。我们分别标记为 No1 裸露边坡和 No2 自然恢复边坡,人工植草 2 a 的边坡,标记为 No3 人工植草 2 a;人工植草 3 a 的边坡,标记为 No3 人工植草 3 a。边坡人工种

植植物为草木樨(*Melilotus suaveolens* Ledeb.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、冰草[*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.]、无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)。

1.3 土壤材料

针对边坡这个特殊的生境,工程要求土壤设计中要依据养分充足,酸碱适中,结构合理,通透性强,保水性强等原则。依据当地土壤地带性特点和上述土壤设计原则,考虑到边坡生物防护施工技术采用厚层基质喷附技术,边坡绿地土壤(厚层基质)主要由以下成分组成:当地农田土壤、草炭土、土壤结构改良剂(蛭石、珍珠岩等)、有机肥料、速效无机肥、缓效无机肥、保水剂等。

1.4 采样设计及方法

按照样地面积大小确定取样点数。试验共设计 4 个坡面样地,在每个坡面分坡上、坡中、坡脚 3 个位置分别取样,每个位置重复 3 次,分两层取样,取样深度为 0—10 cm 和 10—20 cm,共计取样 72 个,将同一样地多点所取的土样分层充分混合,将混合样带回室内分析。

1.5 样品分析方法

室内理化分析主要参照《土壤理化分析与剖面描述》进行^[3]。大型土壤动物采用手捡法、中小型土壤动物采用 Tullgren 法和湿生土壤动物采用 Baermann 法分离提取土壤动物^[4]。

采用 SPSS11.5 软件对土壤质量因子进行主成分分析,确定主成分以及各因子权重。用模糊综合评判法计算土壤质量综合指数。

2 结果与分析

2.1 人工植被建立过程中边坡的成土发育变化

2.1.1 土壤剖面的分异 边坡不具备植被生长所必需的土壤环境,坡面土状物质只是一种成土母质。在高速公路路堑边坡绿地,由于植被建立时间很短,人工绿化后边坡土剖面除干湿程度的差异以及土体颗粒粗细的变化外,剖面分异不明显。但与人工干扰后裸露边坡相比,已经有了以下的变化。

(1) 表层枯枝落叶积累。积累量与地上生物量、时间有很大的相关性。在土体表层可见处于半分解状态的有机质,呈黑褐色。

(2) 颜色。0—10 cm 土层颜色最深,多呈灰色、灰棕色或黄棕色,这种变化受含水量、有机肥、植物及根系的影响;10—20 cm 次之,20 cm 以下则主要是由于干湿程度的差异而引起的颜色变化。

(3) 植物根系分布。100 cm 剖面内均有植物根系分布,根系大量分布集中在 40 cm 以上的土层。

2.1.2 土壤质地变化 通过对一些典型样地颗粒组成的分析(表 1)发现,由于人工植被建立时间很短,土壤质地没有发生根本的变化,土壤中仍以沙粒(0.25~0.05 mm)为主,但是与无人工建植边坡不同的是人工植被下边坡土壤的黏粒(<0.001 mm)和物理性黏粒(<0.01 mm)含量有所增加。黏粒由于粒径较小,具有巨大的比表面积,吸附能力强,保水保肥力强,对于颗粒组成较粗的边坡土壤来说,黏粒含量的增加对土壤质量的提高具有重要意义。

2.1.3 土壤肥力的变化 土壤肥力是土壤的本质特征,土壤的成土发育过程,正是土壤肥力由无到有、不断完善、不断发展的过程^[3]。因此,在边坡上建立人工植被,开始成土发育最为显著的特征便是土壤肥力的不断提高。本文从土壤养分含量、土壤生物数量和种类等方面出发,分析了人工植被建立后土壤肥力的动态变化过程(结果见表 1)。

表 1 典型样地土壤颗粒组成分析

深度/ cm	各粒级颗粒含量/ %		
	沙粒 (2~0.02 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
0—10	95.40	4.46	0.04
10—20	96.20	3.62	0.18
0—10	96.20	3.71	0.09
10—20	94.20	1.83	0.97
0—10	94.30	5.10	0.60
10—20	93.50	6.38	0.12
0—10	92.80	6.74	0.46
10—20	92.60	6.48	0.92

(1) 土壤养分含量及 pH 值的变化。在公路边坡上因其微弱的生物作用和强烈的风水侵蚀活动,其肥力处于极低的水平,植物所需的各种养分含量也很低。通过分析发现(见表 2),边坡上建立人工植被后,土壤中的有机质、全氮、速效氮、速效磷含量均有显著的增加,而速效钾含量则有所降低。植物所需的土壤养分在生物小循环中,是一个积累与消耗的动态过程,影响养分状况的因素是多方面的,同时受人措施的影响,造成土壤 N、P、K 含量变化的差异。但总体来说,人工植被建立后,土壤养分含量增加,肥力提高。

(2) 土壤动物数量的变化。土壤动物是陆地生态系统的重要组成部分,与植物群落之间有着密切的联系^[6]。土壤动物在生态系统中担负着消费者和分解者的任务^[7],土壤动物能敏感地反映生境的优越程

度及人类活动的影响,已成为监测环境变化的指示生物^[8]。由于公路建设的影响,路域内地表植被遭到破坏,土壤受到扰动,与周围环境相比,小气候和土壤条件发生了巨变。植物群落为土壤动物提供了丰富的食物来源和栖息环境。原生植被发生退化必然会对其中的土壤动物群落产生影响。土壤动物的数量组成、结构变化能够反映土壤环境的变化,因此可作为生态恢复中的一个重要指标。表 3 给出了不同生境土壤动物多样性的对比结果。从表 3 中可以看出随着人工植被定植时间的延长,土壤动物种类和数量都较破坏后的边坡增加了几倍乃至几十倍。

表 2 土壤养分含量以及 pH 值变化

样地 代码	深度/ cm	有机质 含量/ %	全氮/ %	全磷/ %	全钾/ %	pH 值
1	0—10	0.170	0.02	0.54	1.30	8.66
	10—20	0.140	0.01	0.45	1.91	8.59
2	0—10	0.352	0.06	0.39	1.93	8.61
	10—20	0.269	0.04	0.36	2.06	8.57
3	0—10	23.470	0.66	1.51	2.17	7.75
	10—20	2.204	0.08	1.20	2.70	8.52
4	0—10	9.910	0.29	0.84	2.12	7.56
	10—20	1.410	0.05	0.32	2.27	8.41

表 3 不同生境的土壤动物多样性对比

生境类别	动物种群	数量
No3 人工植草 2 a	36	3 068
No4 人工植草 3 a	48	2 978
No2 自然恢复边坡	32	538
原始生境	51	1 872
No1 工程破坏裸露边坡	14	99

(3) 植物种类及其盖度的变化。土壤结构与养分状况对于植物的生长起着关键性的作用,直接影响植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平,是生态系统功能恢复与维持的关键指标之一^[9]。

物种多样性的恢复是提高生态系统的-一个重要方面^[10],另外,物种多样性的衰减和恢复也是土壤退化正逆过程的一个表征^[11]。表 4 列出了人为建植后边坡植物种类及其盖度的变化。

2.2 土壤质量综合评价

土壤质量是土壤的许多物理、化学和生物学性质,以及形成这些性质的一些重要过程的综合体现。因此对土壤质量的综合评价必须建立在对于不同土壤属性的阈值与最适值,各种土壤属性的不同水平间的相互组合对土壤质量的体现,各种土壤属性与土壤

功能之间的关系,形成各种土壤属性的明确的土壤过程等等问题的深入的机理性了解基础之上^[12]。

表 4 不同生境的植物多样性对比

生境类别	植物种类	盖度/ %
No3 人工植草 2 年	23	86
No4 人工植草 3 年	16	73
No2 自然恢复边坡生境	5	20
原始生境	31	58
No1 工程破坏裸露边坡	0	0

边坡上人工植被建立后,边坡开始成土发育,土壤质量得到不断发展,通过对不同样地土壤性状的分析可以评价土壤质量的大小。同时运用多元统计分析,对不同种植时间的人工绿地土壤质量进行综合评价,可以反应出人工植被建立过程中土壤质量的变化情况以及植被与土壤质量之间的相互作用关系。

2.2.1 土壤质量因子隶属度值与权重、负荷量的计算 土壤质量是土壤物理、化学和生物性质的综合反映。因此,本研究从这 3 个方面出发,根据各单项质量指标的代表性和对植被影响的主导性,选择各土壤质量因子表层(0—10 cm)的数据,建立了人工绿地建设过程中土壤质量评价指标体系(见图 1)。

由于土壤质量因子变化具有连续性性质,故各评价指标采用连续性性质的隶属度函数,并从主成分因子负荷量值的正负性,确定隶属度函数分布的升降性,这与各因子对植被的效应相符合。评价因素的鉴定指标是指根据评价因素对作物生长发育的适宜性或限制性而划分出的量值。对于土层厚度,障碍层出现深度,有机质和氮、磷、钾等养分的含量以及土壤动物数量及其种类数等采用升半梯形分布的隶属函数。

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ (x - a) / (b - a) & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

而对土壤 pH 值、容重等因子则采用降半梯形分布的隶属函数,如式(2)所示。

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ (x - a) / (b - a) & b < x < a \\ 0 & x \geq a \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mu(x)$ ——评价因素指标值的隶属函数; X_i ——评价因素指标值; a, b ——分别为评价因素的临界值即鉴定指标。具体到每种评价因素,因其各自的特点,评价模型又有不同的表示方式。根据式(1)和(2)计算了各植被样地肥力因子的隶属度值(见表 5)。

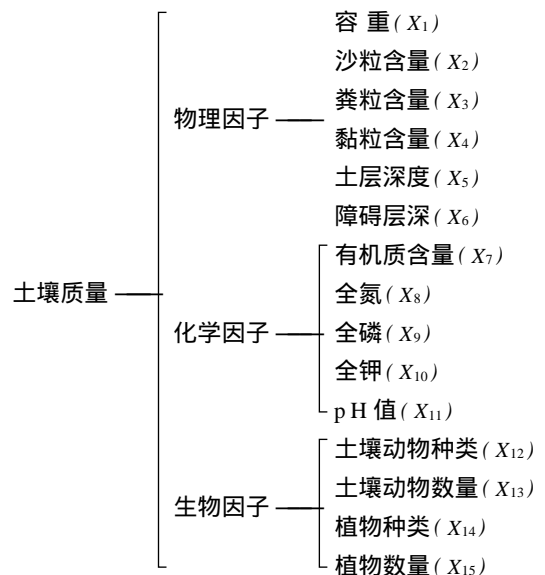


图 1 土壤质量评价指标体系

表 5 各样地肥力因子的实测值和隶属度值

土壤质量因子	样地 1(A/B)	样地 2(A/B)	样地 3(A/B)	样地 4(A/B)
容重 $X_1 / (g \cdot cm^{-3})$	1.2/0.428	1.18/0.457	0.88/0.886	0.85/0.928
物理因子				
砂粒含量 $X_2 / \%$	95.4/0.306	96.2/0.253	94.3/0.38	92.8/0.480
粉粒含量 $X_3 / \%$	4.46/0.297	3.71/0.247	5.1/0.34	6.74/0.449
黏粒含量 $X_4 / \%$	0.04/0.003	0.09/0.018	0.6/0.04	0.46/0.031
土层深度 X_5 / cm	4/0.042	12/0.208	11/0.188	13/0.229
障碍层深度 X_6 / cm	4/0.034	18/0.276	14/0.206	16/0.241
化学因子				
有机质 $X_7 / (g \cdot kg^{-1})$	1.7/0	35.2/0.105	223.7/0.890	93.1/0.346
全氮 $X_8 / (g \cdot kg^{-1})$	0.2/0	0.6/0.015	6.6/0.924	2.9/0.370
全磷 $X_9 / (g \cdot kg^{-1})$	5.4/0.117	3.9/0	15.1/0.925	8.4/0.367
全钾 $X_{10} / (g \cdot kg^{-1})$	13/0.15	19.3/0.465	21.7/0.585	21.2/0.56
pH 值 X_{11}	8.66/0	8.61/0	7.75/0.50	7.56/0.654
生物因子				
土壤动物种类 X_{12}	14/0	32/0.486	36/0.594	48/0.919
土壤动物数量 X_{13}	99/0	538/0.248	3 068/1	2 978/1
植物种类 X_{14}	0/0	5/0.160	23/0.77	16/0.516
植被盖度 $X_{15} / \%$	0/0	20/0.340	1	1

注:A 为各土壤质量因子测定值; B 为各土壤质量因子的隶属度值。

利用 SPSS 分析软件计算各土壤质量因子主成分的贡献率和累计贡献率,第一、二主成分的累积贡献率(89.28%)已足以代表原变量的信息。从分析数据中看到,第一主成分对容重、黏粒含量、有机质、全氮、全磷以及土壤动物数量等有较大的负荷系数,可以认为这些因子对土壤质量变化影响较大。因此,土壤物理、化学和生物性质对植物演替群落的土壤质量都具有明显的作用,仅考处理化因子不能全面反映土壤的内在特性。所以,以第一主成分分析因子负荷量,计算各土壤质量因子在土壤质量中的作用大小,确定它们的权重。

2.2.2 土壤质量综合评价指标值的计算 根据加乘法,对各个质量指标值采用乘法进行合成,计算不同种植时间和不同人为措施的绿地土壤质量的综合指标值(soil quality index, SQI)^[13],计算公式如下

$$SQI = \prod_{i=1}^{13} W_i \times \mu(x_i) \quad (3)$$

式中: W_i ——各肥力因子的权重向量; $\mu(x_i)$ ——各肥力因子的隶属度值,计算结果见表 6。

表 6 各样地肥力的综合指标值(SQI)

样地类型	裸露 边坡	自然恢复 边坡生境	植草 2 a	植草 3 a
SQI 值	0.079	0.155	0.649	0.434

2.2.3 人工植被建立过程中土壤质量的变化 各样地土壤质量的综合指标值(表 6)也表明,植被建立后土壤质量呈增长趋势。在边坡上建立了人工植被后,植物促进了土壤当中的生物循环和生物富集作用。受人工植被和各种人为管护措施的影响,土壤的理化性质得到改善,生物活性增强,土壤质量显著提高。

不同样地的土壤质量增长幅度不一样。从土壤的 SQI 值可以看出,从裸露边坡到自然恢复边坡到种植二年和三年的样地,土壤质量增长显著。但相同植被类型的样地,由于后期人为管护措施差异,以及植物群落不稳定,植物自肥能力不足导致土壤 SQI 值有较大差异。如种植二年的边坡绿地为 0.649,而种植三年的边坡绿地 SQI 值则仅为 0.434。人工恢复边坡土壤 SQI 尽管有所起伏但要明显高于自然恢复边坡。这表明由于不同样地植被类型和各种人为管护措施的力度不同,土壤质量变化有较大差异,表现为:新挖裸露边坡 SQI < 自然恢复边坡 SQI < 人工植草 3 a 边坡 SQI < 人工植草 2 a 边坡 SQI。在人工植被建立过程中,人工施肥和灌溉以及植被类型的不同对肥力的变化产生了较大的影响,土壤质量呈渐变性和跳跃性增长特征。

3 结论

(1) 通过分析表明,在高速公路边坡建立人工植被,随着人工植被建立时间的延长,土壤各理化性质得到改善。

(2) 由于人工植被多为草本植物,根系较浅,生物活动及肥力变化主要表现在土壤表层。主要表现为:表层(0—10 cm)土壤质量的变化要比下层(10—20 cm)显著。土壤养分含量、土壤动物数量和种类数均比下层土壤高。

(3) 相似种植样地,不同种植时间的样地,土壤质量变化差异显著,表现为人工建植后土壤质量增长显著。

(4) 通过主成分分析表明,随着人工植被的建立,边坡开始成土演变,土壤质量提高,肥力最高的样地为种植 2 a 的边坡绿地。

[参 考 文 献]

- [1] 张华,张甘霖. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤, 2001(6): 326—330.
- [2] 许文年,夏振尧,戴方喜,等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用[J]. 中国水土保持, 2005(4): 31—33.
- [3] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1—265.
- [4] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1—387.
- [5] 常学礼, 鄢建国. 科尔沁沙地沙漠化过程中的物种多样性[J]. 应用生态学报, 1997(8): 151—156.
- [6] 殷秀琴, 王海霞, 周道玮. 松嫩草原区不同农业生态系统土壤动物群落特征[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1071—1078.
- [7] 傅必谦, 陈卫, 董晓晖. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 215—223.
- [8] 王海霞, 殷秀琴, 周道玮. 松嫩草原区农牧林复合系统大型土壤动物群落生态学研究[J]. 草业学报, 2003, 12(4): 84—89.
- [9] Bhojvaid P P, Timmer V R. Soil dynamics in an age sequences of Prosopis planted for sodic soil restoration in India[J]. Forest and Ecology and Management, 1998, 106: 181—193.
- [10] Tilman D, Wedin D, Knops J. Production and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 379: 718—720.
- [11] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 648—655.
- [12] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 176—183.
- [13] 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 174—178.