

侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量的协同效应

戴全厚^{1,2}, 薛 蕙¹, 刘国彬¹, 兰 雪², 余 娜², 杨 智²

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要:【目的】探索黄土丘陵区退耕撂荒地植被恢复与土壤相关要素的关系, 为生态恢复重建决策提供理论依据。【方法】以中国科学院安塞水土保持实验站墩山退耕不同年限的撂荒地研究对象, 通过植被群落特征调查和土壤质量测试分析等, 运用相关和回归分析方法对植被恢复过程中植被与土壤质量的协同效应研究。【结果】在其恢复过程中, 植被地上生物量与植被覆盖度呈正相关, 它们与土壤容重呈负相关, 而与土壤大团聚体、水稳性大团聚体、有机质含量、全氮含量、水解氮含量、速效钾含量、微生物量(C、N、P)以及土壤呼吸强度之间呈正相关, 与土壤全磷、速效磷含量无显著相关性。同时, 植被地上生物量和植被覆盖度与土壤抗蚀性关系密切, 它们与表示土壤抗蚀性能的土壤团聚度、结构系数之间呈正相关, 与土壤分散系数、结构体破坏率之间呈负相关。土壤容重与土壤大团聚体、水稳性团聚体含量之间呈负相关, 土壤大团聚体含量与水稳性团聚体含量之间亦呈正相关。【结论】黄土丘陵区退耕撂荒地植被恢复过程中, 土壤质量得到不断恢复提高, 并能促进植被的生长繁衍, 推动植被恢复演替进展, 植被恢复健康和演替的同时, 亦进一步推动土壤质量的改善提高, 二者之间表现为正向互作效应。

关键词: 侵蚀环境; 撂荒地; 植被恢复; 土壤质量; 协同效应

The Synergistic Effect Between Vegetation Recovery and Soil Quality on Abandoned Arable Land in Eroded Hilly Loess Plateau

DAI Quan-hou^{1,2}, XUE Sha¹, LIU Guo-bin¹, LAN Xue², YU Na², YANG Zhi²

(¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi;

²Forestry College Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: 【Objective】The correlation between vegetation recovery and soil relevant elements on abandoned arable land in eroded hilly loess plateau was studied to provide a theory for strategies of ecological reconstruction. 【Method】This research regarded the abandoned arable land for different years on study area as a subject to investigate the characteristics of plant community and analyze soil quality. And it adopted correlation analysis and regressive analysis method to study the synergistic effect between vegetation and soil environmental factors. 【Result】The results indicated that vegetation biomass had a significant positive relationship with vegetation coverage. They had a significant negative correlation with bulk density of soil, and a positive correlation with macroaggregate, water stability macroaggregate, organic matter content, total nitrogen content, hydrolyzable nitrogen content, available kalium content, microbial biomass, and microbial respiration. However, they had no significant relationship with total phosphorus and available phosphorus. At the same time, the vegetation biomass and vegetation coverage correlated soil antierodibility closely. They had a significant positive correlation with soil aggregation degree and structure coefficient, and a negative correlation with soil dispersive coefficient and structural damage rate. Bulk density of soil had a negative correlation with soil total porosity, macroaggregate content and water stability macroaggregate content, and the soil total porosity had a positive correlation with macroaggregate content and water stability macroaggregate content. 【Conclusion】The soil quality was improved, which promoted vegetation succession in the process of vegetation recovery on abandoned arable land in eroded hilly loess plateau.

收稿日期: 2007-07-13; 接受日期: 2007-09-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90502007); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-XB2-05); 国家“973”项目(2007CB407205)

作者简介: 戴全厚(1969-)男, 陕西长武人, 副教授, 博士, 研究方向为水土保持和生态恢复重建。Tel: 0851-3857368; E-mail: qhdairiver@163.com.
通讯作者刘国彬(1958-), 研究员, 博士, 研究方向为水土保持与流域管理。Tel: 029-87012907; E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

Simultaneity, the vegetation succession and recovery improved soil quality. Therefore, there is a synergistic effect between them.

Key words: Erosion environment; Abandoned arable land; Vegetation recovery; Soil quality; Synergistic effect

0 引言

【研究意义】植被与环境之间的关系极为复杂,二者之间的相互关系,一直是生态学研究的重点之一^[1]。植被作为重要的生态因子,是控制水土流失、改善生态环境的有效措施和保证,在自然生态环境中,占有极其重要的地位。土壤是植被生存的环境基础,其性质决定着植被的分布和变化在生态环境中同样占有极为重要的地位。但任何单方面因子的作用往往难以改变该区生态退化的现状,只有二者结合起来,相互耦合协调发展,才能使侵蚀环境生态恢复,实现其可持续发展。【前人研究进展】随着西部大开发重大战略决策的实施,以退耕还林还草为核心的生态环境建设已在西部展开,黄土高原侵蚀环境的植被恢复和重建工作,也越来越受到社会的广泛关注。近年来,有关森林的物种多样性、土壤环境特征及其两者之间关系的研究较多^[2,5],有关草地的相关研究也有所报道^[6,7],但有关退耕撂荒地的研究还不太多见^[8-10],植被恢复与土壤质量相互关系的研究更是较少。【本研究切入点】在土壤侵蚀严重的黄土丘陵沟壑区,退耕撂荒地作为一种重要的土地资源,其植被恢复是治理水土流失和生态环境建设的根本措施,而且植被能否恢复成功,是评价该区生态环境优劣的重要指标。【拟解决的关键问题】笔者以中国科学院安塞水土保持实验站的典型侵蚀环境——黄土丘陵区的退耕撂荒地为例,

研究其植被恢复过程中,植被动态特征与土壤环境质量的协调耦合过程,揭示二者的协同效应关系,旨在为黄土高原侵蚀环境下退耕撂荒地的植被恢复和重建提供科学依据。这对西部生态环境建设和山川秀美工程的顺利实施具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持实验站的墩山(109°18'E、36°51'N),海拔为1 363 m;多年平均降雨量为549 mm,但年际变化大且年内分配不均,其中60%以上集中于7、8、9月;地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,亦为典型的侵蚀环境;土壤为黄土母质上发育的黄绵土,土壤抗冲抗蚀能力差,水土流失严重;土壤质地类型为粉砂壤土,砂粒(2.00~0.05 mm)含量占19.0%,粉粒(0.05~0.02 mm)含量占65.2%,黏粒(<0.02 mm)含量占15.8%。分别选取坡度相当(25°左右),坡面平整,不同退耕撂荒年限(1、3、5、7、10、15、20、25、30、40和50 a)的撂荒植被恢复地作为试验地,其基本特征如表1。用铝饭盒多点(4~6点)采集0~20 cm表层有代表性的原状土样,保持其原有结构状态,运回室内,沿土壤的自然结构节理轻轻剥开,剥成直径为10~20 mm的小土块,并剔除粗根和小石块,在室温下风干备用。同时,在试验地随机选取6个点,用土钻取其

表1 样地基本特征

Table 1 Description of the sampling plots

| 样地 Sites | 退耕年限 Time (a) | 地貌 Topography | 坡向 Aspect | 坡度 Gradient (°) | 海拔 Elevation (m) | 植被类型 Vegetation |
|-------------|------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------------------|--|
| TLA9 | 1 | 梁坡 Hillside-slopes | E | 22 | 1315 | 茵陈蒿 <i>Achillea capillaris</i> |
| TLB13 | 3 | 梁崩坡 Ride-slopes | E | 27 | 1270 | 茵陈蒿 <i>Achillea capillaris</i> |
| TLC2 | 5 | 梁坡 Hillside-slopes | ES11° | 23 | 1196 | 茵陈蒿 <i>Achillea capillaris</i> |
| TLD10 | 7 | 梁坡 Hillside-slopes | NW13° | 23 | 1315 | 茵陈蒿 <i>Achillea capillaris</i> |
| TLE4 | 10 | 梁坡 Hillside-slopes | NE38° | 24 | 1319 | 茵陈蒿 <i>Achillea capillaris</i> |
| TLF11 | 15 | 梁坡 Hillside-slopes | NW35° | 24 | 1292 | 铁干蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i> |
| TLG15 | 20 | 梁崩坡 Ride-slopes | NE40° | 25 | 1270 | 铁干蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i> |
| TLH12 | 25 | 梁坡 Hillside-slopes | NE40° | 22 | 1279 | 铁干蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i> |
| TLI6 | 30 | 沟坡 Gully-slopes | SE18° | 30 | 1297 | 白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> |
| TLJ8 | 40 | 沟坡 Gully-slopes | SE24° | 24 | 1245 | 铁干蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i> |
| TLK1 | 50 | 沟坡 Gully-slopes | E | 23 | 1183 | 铁干蒿-长芒草 <i>Artemisia sacrorum-Stipa bungeana</i> |

0~20 cm 土壤混合样, 除去其中的有机残体和大的石砾, 分成两份, 1 份鲜样冰箱冷藏保存, 供土壤微生物性质测定; 另 1 份样品风干过筛, 充分混匀后储藏备用。

1.2 研究方法

1.2.1 群落特征调查 在退耕撂荒 1~50 a 的 11 块试验样地上, 每块样地中随机选取 1 m×1 m 样方, 重复 4 次, 在植被生长季节, 每月统计植物种类, 物种频度、多度、盖度、高度和密度, 确定退耕撂荒序列中的关键物种, 监测其变化和更替。同时将样方内植被齐地面刈割, 分种统计地上部分鲜重。植物鲜样在恒温箱中 60℃ 烘至恒重, 称干重, 同时计算其物种多样性指数 (Shannon-Wiener 指数)。

1.2.2 土壤质量测定 土壤有机质含量用重铬酸钾氧化外加热法测定, 全氮 (N) 用半微量凯氏法测定; 土壤全磷 (P) 用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法 (岛津 2401-紫外可见分光光度计, 日本产); 碱解氮采用碱解扩散法; 速效磷用 Olsen 法; 速效钾用乙酸铵提取-火焰光度法。以上分析均参考文献 [11] 中方法。土壤微生物量采用氯仿熏蒸法, 熏蒸后用硫酸钾浸提, 用全自动有机碳分析仪 (Tekmar-Dohrmann Apollo 9000 TOC Combustion Analyzer) 测定微生物量碳, 用全自动定氮仪测定微生物量氮, 并用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度仪测定土壤机械组成和微团聚体, 沙维诺夫干筛法测定大团聚体 (干筛), 改进的约得 (Yoder) 法 [12] 测定水稳性团聚 (湿筛)。

1.2.3 统计分析及计算方法 运用 SPSS 和 Excel 统计软件对土壤、植被等环境因子之间的关系进行相关性分析与回归拟合。相关指标计算如下:

(1) 土壤结构系数 (Q_s)

$$Q_s = \frac{b-a}{b} \times 100 \quad (1)$$

式 (1) 中, a 为 <0.001 mm 微团聚体含量 (%); b 为 <0.001 mm 机械组成含量 (%)。

(2) 土壤团聚度 (D_a)

$$D_a = \frac{c-d}{c} \times 100 \quad (2)$$

式 (2) 中, c 为 >0.05 mm 微团聚体含量 (%); d 为 >0.05 mm 机械组成含量 (%)。

(3) 分散系数 (Q_d)

$$Q_d = \frac{a}{b} \times 100 \quad (3)$$

式 (3) 中, a 为 <0.001 mm 微团聚体含量 (%); b 为 <0.001 mm 机械组成含量 (%)。

(4) 结构体破坏率 (R_b)

$$R_b = \frac{e-f}{e} \times 100 \quad (4)$$

式 (4) 中, e 为 >0.25 mm 团聚体干筛含量 (%); f 为 >0.25 mm 团聚体湿筛含量。

2 结果与分析

2.1 植被地上生物量与土壤质量

2.1.1 地上生物量与土壤养分 退耕撂荒地植被演替中, 植被地上生物量与土壤养分关系密切, 通过对其与土壤养分各参数进行相关性分析, 结果表明, 植被地上生物量与土壤有机质含量、全氮含量、水解氮含量、速效钾含量之间极显著相关 ($P < 0.01$) (图 1), 与土壤微生物量碳、氮、磷含量之间显著相关 ($P < 0.05$) (图 2), 而与土壤全磷、速效磷、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量之间相关性不显著 ($P > 0.05$)。对存在

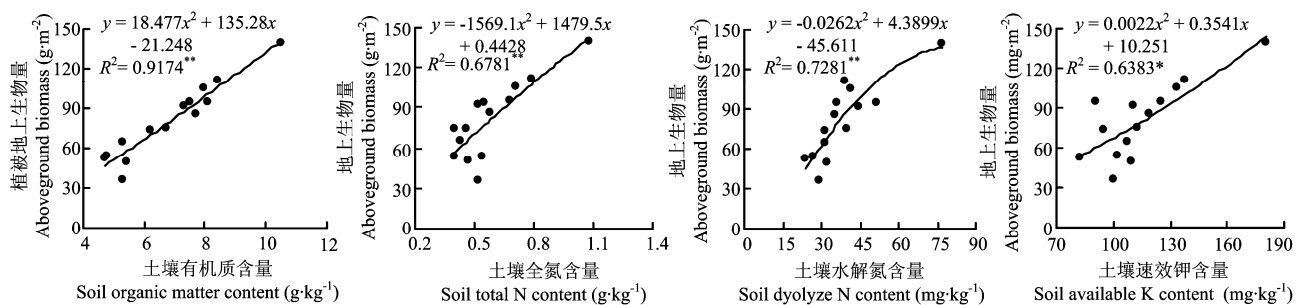


图 1 地上生物量与土壤养分间的效应

Fig. 1 Regression between aboveground biomass and soil nutrition

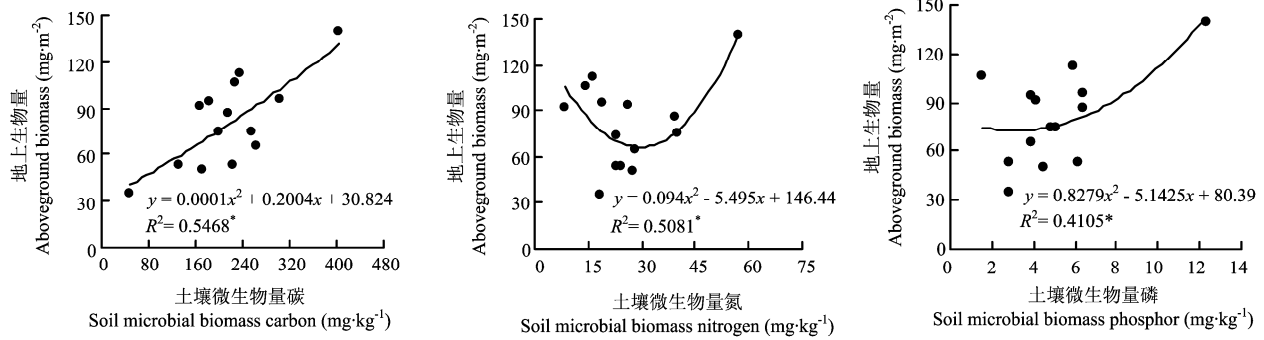


图2 地上生物量与微生物量间的效应

Fig. 2 Regression between aboveground biomass and soil microbial biomass

相关关系的各参数进行回归分析, 获得了它们之间的耦合效应方程。

从耦合效应方程可以看出, 植被地上生物量与土壤有机质含量、全氮含量、水解氮含量、速效钾含量及土壤微生物量碳、氮、磷含量呈二次曲线正相关。结果表明, 黄土丘陵区土壤有机质含量、全氮含量、

水解氮含量、速效钾含量和微生物量含量等土壤养分含量的增加能促进植被生产力(主要为地上生物量)的提高, 同时, 植被生产力的提高又能促进土壤养分的积累富集, 加速植被生境的改善, 它们之间为正向互作效应。

分析结果表明, 植被地上生物量与土壤全磷、速效磷、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量之间无显著相关性, 但并不是说它们与植被的生长发育没有关系, 而是它们在土壤恢复过程中的量还没有达到能显著影响植被的程度, 其对植被生长的影响效应亦未达到显著水平。实际上, 水解氮中, 很大一部分就是由 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 构成的, 因而水解氮与植被地上生物量的关系在某种程度上也反映了 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 对植被生产力的作用。虽然植被生产力(地上生物量)没有与

NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 单因素形成显著相关关系, 但却与包含它们在内的水解氮含量形成了极显著的正相关关系, 由此可见, NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 与其它形式的有效氮一样对植被群落物种的生长发育极为重要。土壤全磷在退耕撂荒地植被演替中变化不明显, 与植被地上生物量没有显著相关性, 而速效磷略有增大, 与植被地上生物量也没有显著相关性, 可见黄土丘陵区土壤磷素是非常低的(速磷含量仅为 1.01~3.89 mg·kg⁻¹), 其量还不足以对植被生长造成直接影响。

2.1.2 植被地上生物量与土壤结构及侵蚀性能 土壤是植被生存的基础, 且结构决定功能, 植被生产力(地上生物量)是其功能的重要体现者。对植被地上生物量与土壤物理结构各参数之间进行相关性分析, 结果表明, 植被地上生物量与表示土壤结构性能的容重、大团聚体和水稳性团聚体含量以及表示抗侵蚀性能的土壤结构系数、团聚度、分散系数和结构体破坏率间存在极显著相关关系 ($P < 0.01$) (图 3, 图 4), 而与土壤微团聚体含量之间无显著相关性 ($P > 0.05$)。对以上所有存在的相关关系进行回归分析, 建立了它们之间的耦合效应关系方程。

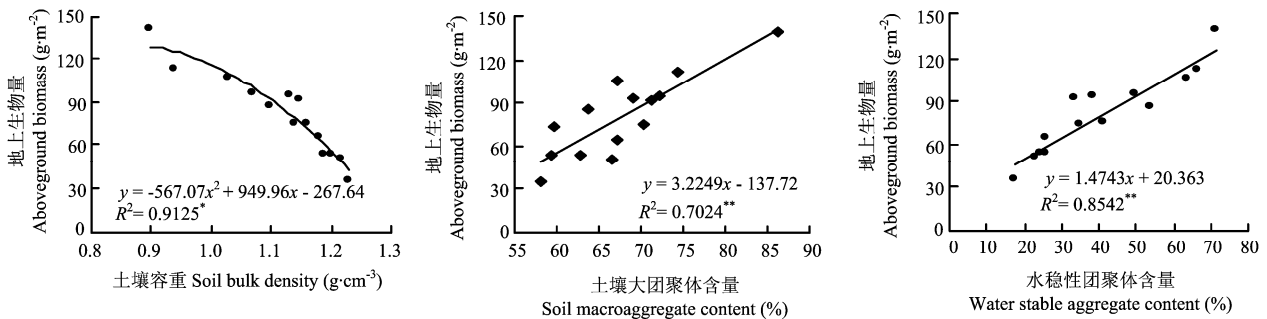


图3 地上生物量与土壤结构间的效应

Fig. 3 Regression between aboveground biomass and soil structure

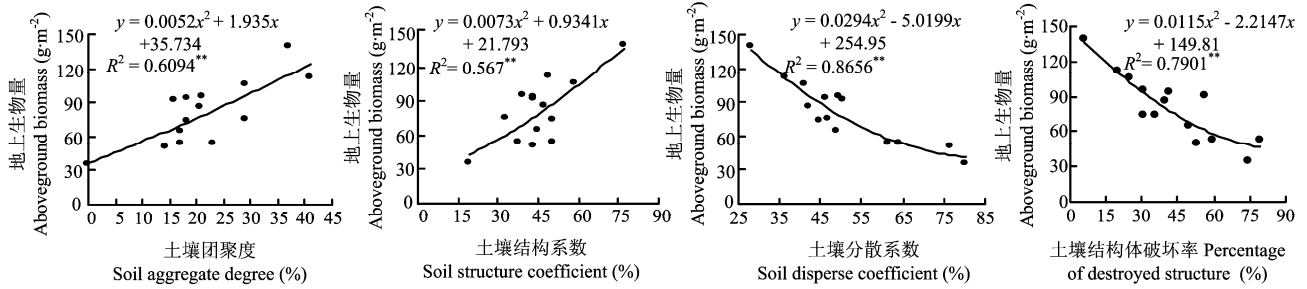


图 4 地上生物量与土壤抗侵蚀性能效应

Fig. 4 Regression between aboveground biomass and soil anti-erosibility character

从这些耦合效应关系方程中可知，植被地上生物量（生产力）与土壤容重呈二次曲线负相关，与土壤大团聚体含量、水稳性团聚体含量呈线性正相关，与土壤团聚度和结构系数之间呈二次曲线正相关。显然，从这些耦合效应关系方程（图 3）中可以看出，侵蚀环境生态恢复过程中，随着植被的恢复，土壤容重逐渐减小，大团聚体和水稳性团聚体含量逐渐增加。即植被恢复有助于土壤物理结构的改善，同时，土壤物理结构的改善同样可以促进植被的恢复，地上生物量（生产力）的进一步增大。植被地上生物量（生产力）与土壤物理结构之间相互促进驱动，表现为明显的正向互作效应。

土壤团聚度、结构系数、分散系数和结构体破坏率均为反映土壤结构稳定性，特别是土壤抗蚀性能的重要指标，从协同效应方程（图 4）中亦可看出植被地上生物量（生产力）与土壤团聚度和结构系数呈二次曲线正相关；与土壤分散系数和结构体破坏率呈二次曲线负相关。显然，土壤抵抗侵蚀的性能随着植被的恢复而逐渐增强，即植被的恢复能促使土壤结构的稳定，同样土壤抗蚀性的增强又能促进植被的恢复，提高其生产力（地上生物量），改善其生境。植被地上生物量（生产力）与土壤抗蚀性能也是相互作用，彼此驱动，表现为显著的正向互作效应。

2.1.3 植被地上生物量与土壤呼吸 生态恢复过程中，植被地上生物量（生产力）与土壤呼吸关系密切，相关分析结果表明，植被地上生物量与土壤呼吸强度之间极显著相关 ($P \leq 0.01$)。同时对二者进行回归分析，确定了二者间的协同效应方程（图 5），从方程中可以看出，植被地上生物量（生产力）与土壤呼吸强度之间呈二次曲线正相关，即土壤呼吸强度随着植被的恢复，地上生物量的增大而逐渐增强。

2.2 植被覆盖度与土壤质量

本研究表明，植被地上生物量与土壤质量关系密

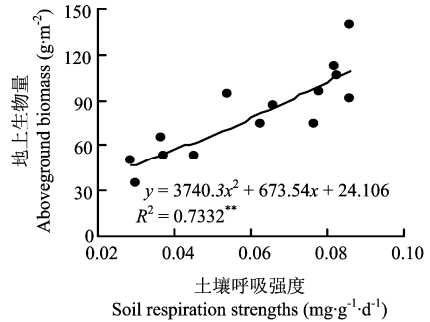


图 5 地上生物量与土壤呼吸强度间的效应

Fig. 5 Regression between aboveground biomass and soil respiration strengths

切，其大小在很大程度上取决于土壤质量的好坏。植被覆盖度是群落地上生物量的外在表现，首先对植被覆盖度与其地上生物量之间进行相关性分析，结果表明，植被覆盖度与其地上生物量之间极显著相关 ($P < 0.01$)，其回归效应关系方程显示，植被覆盖度随地上生物量的增加而呈二次曲线增大（图 6），据此推断植被覆盖度与土壤质量关系密切。

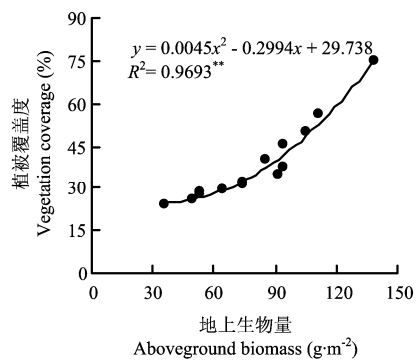


图 6 植被覆盖度与地上生物量间的效应

Fig. 6 Regression between vegetation coverage and aboveground biomass

2.2.1 植被覆盖度与土壤养分 通过对植被覆盖度与土壤养分之间的相关分析，结果显示，植被覆盖度与土壤有机质含量、全氮含量、水解氮含量、速效钾含量、微生物量碳之间极显著相关 ($P < 0.01$)，与土壤微生物量氮、磷之间显著相关 ($P < 0.05$)。而与土壤全磷、速效磷、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量之间相关性不显著 ($P > 0.05$)。同时对以上存在的相关关系进行回归分析，获得了植被覆盖度与土壤养分及土壤微生物量各参数之间的耦合效应关系方程 (图 7, 图 8)。

植被覆盖度与土壤养分及土壤微生物量参数耦合

效应关系方程表明，植被覆盖度与土壤有机质含量、土壤全氮含量、水解氮含量、速效钾含量、微生物量碳、磷含量之间呈二次曲线正相关，也就是说随着土壤有机质含量、土壤全氮含量、水解氮含量、速效钾含量、微生物量碳、微生物量磷含量的增加，植被覆盖度亦不断增大，植被恢复演替亦随之推进；而随着土壤微生物量氮含量的增加，植被覆盖度先下降而后逐步增大。反之亦然，植被覆盖度的增加也会促进土壤养分及微生物量含量的提高，维护土壤肥力，保证其生产力。二者之间为正向互作效应。

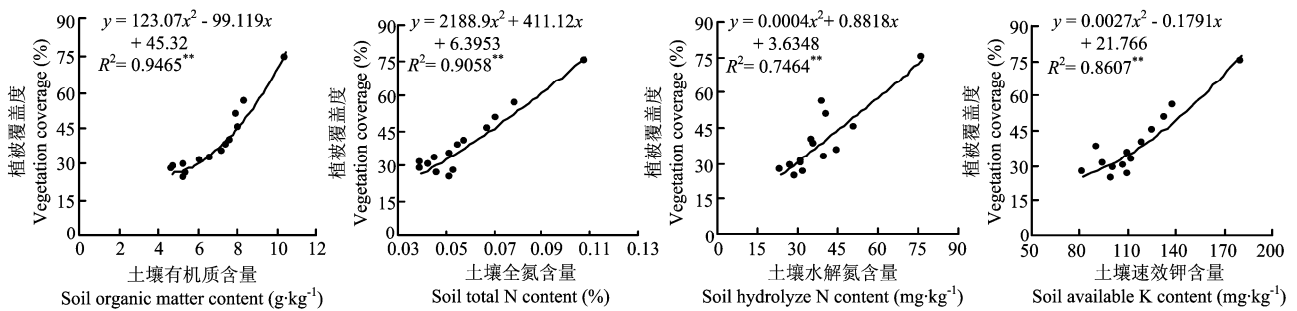


图 7 植被覆盖度与土壤养分的效应

Fig.7 Regression between vegetation coverage and soil nutrition

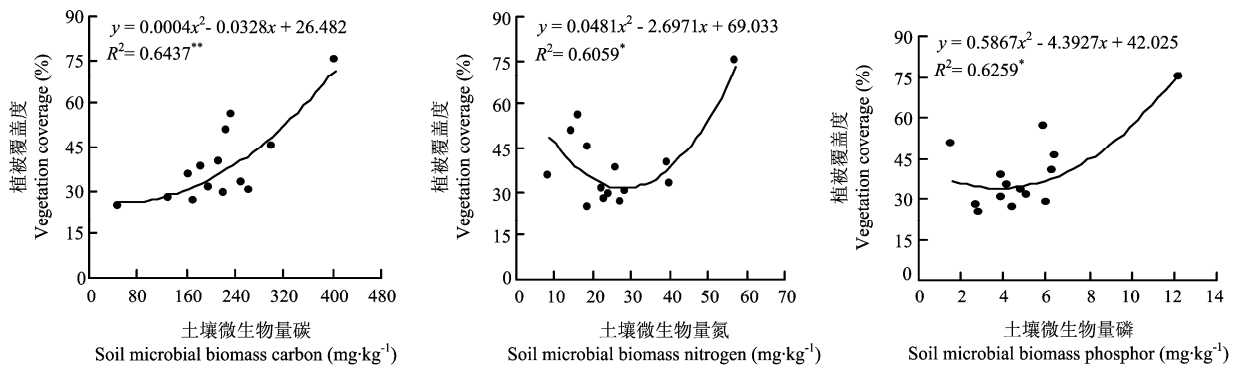


图 8 植被覆盖度与微生物量间的效应

Fig. 8 Regression between vegetation coverage and soil microbial biomass

植被覆盖度与土壤磷素相关性不明显，主要是由于黄土丘陵区磷素比较缺乏引起的。植被覆盖度与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量无显著相关，主要是由于该区在生态恢复过程中，随着植被盖度的增大，矿质氮流失加剧^[13-15]所致。

2.2.2 植被覆盖度与土壤结构及抗侵蚀性能 同样对植被覆盖度与土壤结构和抗侵蚀性能各参数进行相

关性分析，结果表明，植被覆盖度与表示土壤结构的土壤容重、水稳性团聚体及表示土壤抗侵蚀性能的土壤分散系数和结构体破坏率之间存在极显著相关关系 ($P < 0.01$)；与其它表示土壤抗侵蚀性能的土壤团聚度、结构系数之间显著相关 ($P < 0.05$)。同时，对这些存在的相关关系进行回归分析，确定了它们之间的协同效应关系方程 (图 9, 图 10)。

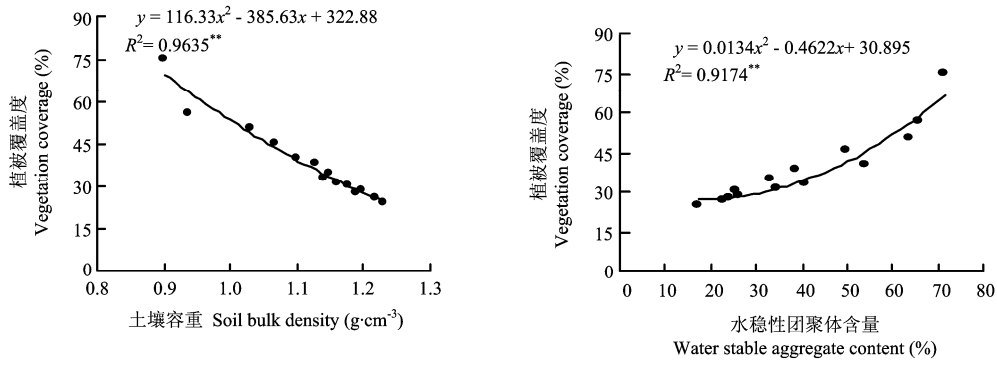


图9 植被覆盖度与土壤结构的效应关系

Fig. 9 Regression between vegetation coverage and soil structure

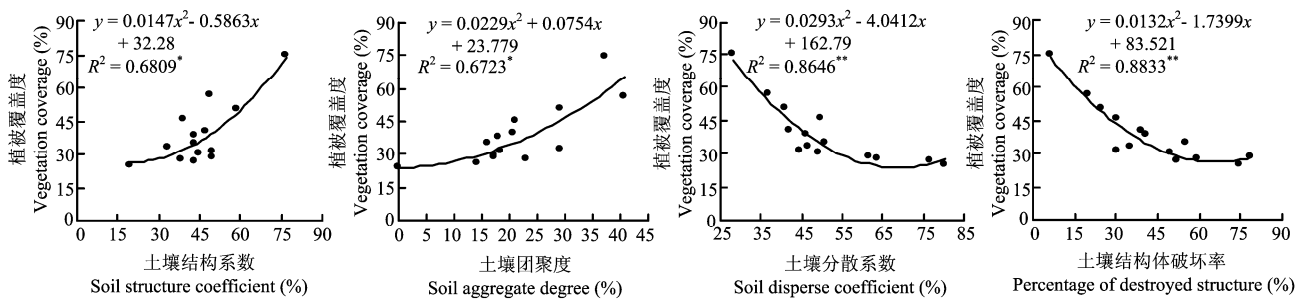


图10 植被覆盖度与土壤抗侵蚀性能的效应

Fig. 10 Regression between vegetation coverage and soil anti-erosibility character

从植被覆盖度与土壤结构和抗侵蚀性能相互作用耦合效应关系方程中可以看出，植被覆盖度与土壤容重、分散系数、结构体破坏率之间呈二次曲线负相关，与土壤总孔隙度、水稳性团聚体含量、土壤团聚度、结构系数之间呈二次曲线正相关。显然，随着植被覆盖度的增加，土壤容重变小，总孔隙度增大，水稳性团聚体含量增多，土壤结构不断改善；同时，土壤分散系数减小，结构体破坏率降低，而土壤团聚度和结构系数不断增大，土壤的结构稳定性越来越强，其抵抗侵蚀的能力逐渐提高。同样，土壤结构改善，稳定性增强，抵抗侵蚀能力提高又能促使植被的恢复，植被覆盖度的增加。二者之间表现为明显的正向互作效应。

2.2.3 植被覆盖度与土壤呼吸 相关性分析结果表明，植被覆盖度与土壤呼吸强度之间显著相关 ($P < 0.05$)，对相关关系进行回归分析，确定了其相互协同效应方程 (图 11)。显然，植被覆盖度与土壤呼吸强度呈二次曲线正相关，即随着植被覆盖度的增加，土

壤呼吸强度逐渐增强。这主要是由于植被覆盖度的增加使土壤微生物数量不断增加所致，同样，土壤呼吸强度的增强又能促进植被的生长发育，使植被覆盖度增大。显然，二者之间为正向互作效应。

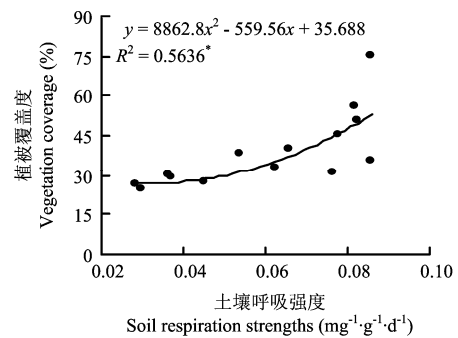


图11 植被覆盖度与土壤呼吸强度效应

Fig. 11 Regression between vegetation coverage and soil respiration strengths

2.3 物种多样性与土壤质量

本研究表明, 植被地上生物量和植被覆盖度与土壤质量关系密切, 呈正向互作效应关系, 本研究选取 Shannon-Wiener 指数作为退耕撂荒地植被演替中物种多样性的标定参数, 首先探讨物种多样性与植被地上生物量和植被覆盖度之间的关系, 相关分析结果显示, 物种多样性与植被地上生物量、植被覆盖度之间无显著相关性 ($P>0.05$)。同时, 对物种多样性和土壤质量各参数之间进行相关性分析表明, 物种多样性与土壤质量各参数之间的相关性亦不显著 ($P>0.05$), 因而, 黄土丘陵区侵蚀环境土壤质量对物种多样性的影响较小, 物种多样性的变化也不足以引起土壤质量的改变, 二者之间的相互作用微弱。

3 讨论

植被恢复在生态恢复过程中具有重要的作用。植被恢复演替是改善土壤理化性状的关键因素之一, 在其恢复过程中, 土壤物理结构首先得到改善, 土壤通透性提高, 进而导致土壤养分含量增加, 土壤微生物和土壤动物数量增加, 物质分解循环能力增强。同样, 土壤性状的改善最终引起植被群落生长的节律性变化, 植被初级生产力(地上生物量)和植被覆盖度增大。与此同时, 随着植被演替的进行, 在退耕撂荒地年限较长的地块还可以观察到明显的苔藓、地衣等生物结皮, 且生长发育良好, 形成了致密的地表保护层, 这是一种良性的互动效应。生态系统的退化过程也是由于植被退化、消亡而引起的土壤质量恶性演变的互动效应, 如草原的荒漠化, 其主要就是由于持续过渡放牧首先引起植物多样性、覆盖度、高度、根量和地上生物量(初级生产力)的下降, 地面开始出现小的裸露斑块, 随着放牧的延续, 裸露斑块数量增大, 面积增大, 最终集中连片, 并在风力、水力作用下, 其水蚀、风蚀加剧, 土地沙化, 土壤结构遭到破坏, 养分流失严重, 抵抗侵蚀的能力急剧下降, 土壤环境不断恶化, 其结果又反作用于草原植被, 制止植物的生长、繁衍, 加速了草原植被的退化消亡, 从而导致整个草原生态系统退化。

黄土丘陵区地处森林草原过渡带, 其生态恢复不仅是土壤质量的恢复, 也是其植物区系成分、密度、盖度、地上生物量以及主要植物种群数量的恢复^[20,21]。土壤质量的恢复主要表现在土壤环境的优化, 即土壤结构改善, 有机质和养分含量增加, 土壤湿度增大和生物活性提高^[22]。该区坡耕地在退耕撂荒初期, 土壤

理化性状较差, 土壤质量较低, 植被覆盖度较小, 初级生产力也不高, 其群落功能还不能完全发挥, 系统功能脆弱, 因而, 在此时一定要减少对其的人为干扰^[23-25], 如采取封禁措施等。实践证明, 退耕撂荒后, 只要破坏不严重, 植被和土壤均有恢复成自然状况的趋势, 即植被随退耕撂荒年限的递增而逐渐恢复其自然面貌, 土壤理化性状也逐渐改善, 土壤质量不断提高, 其抵抗侵蚀的能力也不断增强。但退耕撂荒后如继续对其进行干扰破坏, 则会引起环境的进一步恶化, 土壤侵蚀加剧, 导致地形破碎, 植被和土壤恢复受阻, 甚至引起土壤退化和植被的逆行演替^[26]。

植被在恢复过程中, 植被生态参数与土壤质量参数之间存在着显著的互作耦合效应, 其主要是由于植被在利用土壤养分的同时, 产生大量的植物枯落物和根系分泌物等, 分解释放养分归还土壤, 如此往复, 相互促进。

4 结论

以退耕撂荒地植被恢复演替为研究对象, 运用相关和回归分析方法进行植被与土壤环境因子的协同效应关系研究, 结果表明, 在其恢复过程中, 植被地上生物量与植被覆盖度呈正相关, 它们与土壤容重呈负相关, 而与土壤总孔隙度、大团聚体、水稳性大团聚体、有机质含量、全氮含量、水解氮含量、速效钾含量、微生物量(碳、氮、磷)以及土壤呼吸强度之间呈正相关, 与土壤全磷、速效磷含量无显著相关性。同时, 植被地上生物量和植被覆盖度与土壤抗蚀性关系密切, 它们与表示土壤抗蚀性能的土壤团聚度、结构系数之间呈正相关, 与土壤分散系数、结构体破坏率之间呈负相关。土壤容重与土壤总孔隙度、大团聚体、水稳性团聚体含量之间呈负相关, 土壤总孔隙度与土壤大团聚体、水稳性团聚体含量之间呈正相关, 土壤大团聚体含量与水稳性团聚体含量之间亦呈正相关。黄土丘陵区退耕撂荒地植被恢复过程中, 土壤质量得到不断恢复提高, 并能促进植被的生长繁衍, 推动植被恢复演替进展, 植被的恢复健康和演替的同时, 亦进一步推动土壤质量的改善提高, 二者之间表现为正向互作效应。

References

- [1] 雷相东, 张会儒, 李冬兰, 梁毓照. 东北过伐林区森林类型的物种多样性比较研究. 生态学杂志, 2003, 22(5): 47-50.

Lei X D, Zhang H R, Li D L, Liang Y Z. Comparison of plant species

- diversity of four forest types in over-logged forest area in Northeastern China. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22 (5): 47-50. (in Chinese)
- [2] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 潘开文, 赵常明, 陈庆恒. 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物理性质的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 648-655.
Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, Pan K W, Zhao C M, Chen Q H. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 648-655. (in Chinese)
- [3] 袁永孝, 郭水良, 曹同, 郭元涛, 李军, 姜玉乙, 杨晶, 仇发. 白石砬子自然保护区森林植被和主要树种分布的环境解释. *辽宁林业科技*, 2002, (1): 1-6.
Yuan Y X, Guo S L, Cao T, Guo Y T, Li J, Jiang Y Y, Yang J, Qiu F. Environmental interpretation on distribution of forest vegetation and main tree species in Baishilazi nature reserve. *Journal of Liaoning Forestry Science and Technology*, 2002, (1): 1-6. (in Chinese)
- [4] 陈光升, 钟章成. 重庆缙云山常绿阔叶林群落物种多样性与土壤因子的关系. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1): 12-17.
Chen G S, Zhong Z C. Relationship between species diversity and soil factors of evergreen broad-leaved forest in Jinyun mountain, Chongqing. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10 (1): 12-17. (in Chinese)
- [5] 相辉, 岳明. 陕北黄土高原森林植被数量分类及环境解释. *西北植物学报*, 2001, 21(4): 726-731.
Xiang H, Yue M. Quantitative classification and environmental interpretation on forest communities in Loess Plateau of the north of Shaanxi Province. *Acta Botanica Boreal-Occidentalia Sinica*, 2001, 21(4): 726-731. (in Chinese)
- [6] 杨小波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系. *生态学报*, 2002, 22(2): 190-196.
Yang X B, Zhang T L, Wu Q S. The relationship between biodiversity and soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 190-196. (in Chinese)
- [7] 王琳, 张金屯, 上官铁梁, 樊龙锁. 历山山地草甸的物种多样性及其与土壤理化性质的关系. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1): 18-22.
Wang L, Zhang J T, Shangguan T L, Fan L S. Species diversity of mountain meadow of Lishan and the relation with the soil physicochemical properties. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(1): 18-22. (in Chinese)
- [8] 侯扶江, 南志标, 肖金玉, 常生华. 重牧退化草地的植被、土壤及其耦合特征. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 915-922.
Hou F J, Nan Z B, Xiao J Y, Chang S H. Characteristics of vegetation, soil, and their coupling of degraded grasslands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 915-922. (in Chinese)
- [9] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析. *土壤学报*, 2005, 42(5): 744-752.
Jiao J Y, Ma X H, Bai W J, Jiao F, Wen Z M. Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on abandoned cropland on hilly-gullied Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 744-752. (in Chinese)
- [10] 杨小波, 吴庆书. 海南岛热带地区弃荒农田次生植被恢复特点. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 477-482.
Yang X B, Wu Q S. Vegetation development on tropical abandoned fields, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(4): 477-482. (in Chinese)
- [11] 鲁如坤. *土壤农业化学方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 13-169.
Lu R K. *Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1999: 13-169. (in Chinese)
- [12] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究. 杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1996.
Liu G B. Study on Soil Anti-scourability and Its Mechanism of Grassland on Loess Plateau. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 1996. (in Chinese)
- [13] 张兴昌, 邵明安. 植被覆盖度对流域有机质和氮素径流流失的影响. *草地学报*, 2000, 8(3): 198-203.
Zhang X C, Shao M A. Soil organic matter and nitrogen losses by erosion in little catchment model as effected by vegetation coverage. *Acta Agrestia Sinica*, 2000, 8(3): 198-203. (in Chinese)
- [14] Pimental D. *World Soil Erosion, Cambridge*. UK: Cambridge University Press, 1993: 1-5.
- [15] Castillo V M, Martinez-Mena M, Albaladejo J. Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 1116-1121.
- [16] Tilman D, Haddi A E. Drought and biodiversity in grasslands. *Oecologia*, 1992, 89: 257-264.
- [17] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 257-261.
Li X R, Zhang J G, Liu L C, Chen H S, Shi Q H. Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in

- an arid desert region of China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, 24(3): 257-261. (in Chinese)
- [18] Huston M A. Hidden treatments in ecological experiments: re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 1997, 10: 449-460.
- [19] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 潘开文, 赵常明, 陈庆恒. 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. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 648-655.
- Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, Pan K W, Zhao C M, Chen Y H. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25 (6): 648-655. (in Chinese)
- [20] 王炜, 刘钟龄, 郝敦元, 梁存柱. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究 I. 退化草原的基本特征与恢复演替动力. *植物生态学报*, 1996, 20(5): 449-459.
- Wang W, Liu Z L, Hao D Y, Liang C Z. Research on the restoring succession of the degenerated grassland in Inner Mongolia I. Basic characteristics and driving force for restoration of the degenerated grassland. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1996, 20(5): 449-459. (in Chinese)
- [21] Minshall G W, Petersen R. Species richness in streams of different size from the same drainage basin. *American Naturalist*, 1985, 135: 16-38.
- [22] Pichtel J R, Dick W A, Sutton P. Comparison of amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine croplands. *Environment Qual*, 1994, 23(40): 766-772.
- [23] 周道玮, 钟秀丽. 干扰生态理论的基本概念和扰动生态学理论框架. *东北师大学报自然科学版*, 1996, (1): 90-96.
- Zhou D W, Zhong X L. Fundamental concepts of disturbance ecological theory and fram frame work of disturbance ecology. *Journal of Northeast Normal University*, 1996, (1): 90-96. (in Chinese)
- [24] Cains J. Recovery and restoration of damage ecosystem. Mich: Ann Arbor Science, 1979: 164-169.
- [25] Dix R L, Swan J M A. The roles of disturbance and succession in upland forest at Candle Lake, Saskatchewan. *Canadian Journal of Botany*, 1971, 49: 657-676.
- [26] 田洪艳, 周道玮, 郭平. 不同撂荒年限的草原农田土壤及植被的变化规律研究. *东北师大学报自然科学版*, 2001, 33(4): 72-77.
- Tian H Y, Zhou D W, Guo P. The change of soil and vegetation with different years of leaving uncultivated. *Journal of Northeast Normal University*, 2001, 33(4): 72-77. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)