

# 岩石边坡植被建植初期植被特征与土壤养分动态

王志泰<sup>1,2</sup>, 李毅<sup>1\*</sup>, 王志杰<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 贵州大学林学院, 贵阳 550025;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要:** 为了解边坡生态防护工程植被建植初期植物特征与基质养分变化规律, 依托实际工程, 采用定位研究法, 对 3 个不同坡向、坡度的边坡在人工植被建植后第 1 周年主要群落特征(物种、盖度和高度等)和土壤养分因子(如有机质和速效态养分元素)等每月进行跟踪测试。结果表明: 1) 边坡人工植被建植 1 周年内, 植物植被的数量特征总体上存在明显的季节性变化, 物种数在建植初期较多, 在冬、春季物种数最低, 第 2 年返青后逐渐增加。3 个边坡存活部分盖度在冬春季平均盖度最低, 到 5 月份随气温回升而突增, 经建植周年后, 平均盖度基本相同, 在 60%左右, 群落存活部分平均高度的时间变异特征符合 3 次幂函数。2) 3 个边坡土壤速效态养分与有机质总体上在周年内有较为一致的变化趋势, 但相互之间存在明显的差异, 周年期末碱解氮和有效磷含量与建植初期相比有所下降, 速效钾与有机质含量均高于建植初期。3) 通过多元逐步回归分析, 除有机质与植被群落数量特征无线性回归关系外, 其余速效态的土壤元素均有一定的多元线性关系, 然而边坡之间的同一土壤养分因子与植被群落特征相关指标之间的相关性差别较大, 无法形成统一的解释方程, 还需后续研究中综合考虑多种影响因子及其之间的交互关系。

**关键词:** 土壤, 养分, 植被, 岩石边坡, 建植初期, 植物特征

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.037

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0215-07

王志泰, 李毅, 王志杰. 岩石边坡植被建植初期植被特征与土壤养分动态[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 215-221.  
Wang Zhitai, Li Yi, Wang Zhitjie. Characteristics and soil nutrient dynamics in beginning period of artificial vegetation on rock slope[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 215-221. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

近年来各种类型的工程迹地(如废弃矿、边坡等)植物恢复受到社会的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。土壤是植物赖以生存的物质基础<sup>[4-5]</sup>,是工程迹地植被恢复和生态环境建设的主要制约因素。客土喷播技术以及在其基础上发展起来的厚层基质喷附技术、三维植被网技术等是岩石边坡植被恢复的有效技术措施<sup>[6-8]</sup>。由于工程开挖形成的岩石边坡坡度较大(一般在 45°以上),植被护坡工程中植被建植的土壤非常有限(一般在 10 cm 厚以下)<sup>[6]</sup>,且人工植被具有较大的密度,完全覆盖于坡面。因此,植被建植初期,土壤养分变化是边坡植被恢复效果及长期稳定发展的关键问题,对其进行深入研究,可为边坡植被重建及养护管理提供科学依据,具有重要的理论和现实意义。

近年,已有学者开始关注边坡植被建植后客土养分变化规律,牛海波等<sup>[9]</sup>以实际工程为背景,选择 4 个植被混凝土生态防护样地边坡为研究对象,对植被混凝土相邻年份(2007 年和 2008 年)土壤主要肥力因子进行定量

测定分析。舒安平等<sup>[10]</sup>通过对半干旱区生态护坡工程客土养分衰减特征与恢复趋势研究,结果表明客土养分在建植初期出现了不同程度的衰减特征,之后通过枯落物的补偿有回复的可能;李绍才等<sup>[11]</sup>通过模拟边坡的观测试验,对岩石边坡基质——植被系统的养分循环过程进行了研究,分析结果表明各养分元素(除 K 元素外)的年归还量均大于年存留量,坡面植被具有养分高速循环利用特征;张展等<sup>[12]</sup>采用现场调查、观测、试验等多种试验方法,对黄延高速公路绿化植物、边坡土壤理化性质以及植物群落组成进行了研究,提出土壤肥力与植物恢复是相辅相成的,土壤肥力随人工植被建立时间的延长而逐渐恢复;余海龙等<sup>[13]</sup>在呼集高速公路卓资段路堑边坡 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,结果表明,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;孔刚等<sup>[14]</sup>通过室内人工降雨模拟试验,研究不同坡度土壤侵蚀和养分流失的过程与机制。刘大翔等<sup>[15]</sup>研究了水泥边坡植被混凝土肥力指标随坡向、坡位和年限的变化特性。研究结果表明:土壤中养分的流失量随坡度的增大而增大,但在 20°附近时存在转折点,25°时养分流失量反而减小。大多数研究主要采用空间代替时间的方式,以一期数据分析不同恢复期人工边坡的植物特征与土壤养分。关于新建岩石边坡植被群落特征与土壤养分定位定期的跟踪研究鲜见报道。

收稿日期: 2011-05-20 修订日期: 2011-10-13

基金项目: 贵州省社发攻关计划项目(黔科合 SZ 字 [2009] 3026 号)

作者简介: 王志泰(1975—),男,甘肃会宁人,副教授,博士。主要从事边坡生态恢复方面的研究。兰州 甘肃农业大学林学院, 730070。

Email: wzhitai@163.com

\*通信作者: 李毅(1962—)男,湖北汉川人,甘肃农业大学教授,博导。主要从事水土保持与林木遗传育种研究。兰州 甘肃农业大学林学院, 730070。Email: liyi@gsau.edu.cn

本文依托贵阳市花溪区贵阳绕城高速公路金竹立交路堑边坡生态防护试验工程,通过对客土喷播完工后主要土壤养分因子(如有机质和速效态养分元素)及植物生长因子(物种、盖度和高度等)等进行定点定期系统跟踪测试,以建植第1周年12个月试验数据分析边坡生态防护工程植被建植初期基质养分变化规律,为确立客土养分与植物生长因子之间关系、建立生态护坡理论体系奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选取贵阳市环城高速南环线金竹立交边坡作为研究基地。研究区位于黔中腹地贵阳市花溪区,地处E106°27′—106°52′, N26°11′—26°34′,具有明显的高原性季风气候特点,系亚热带湿润温和型气候。年均降雨量1200 mm左右。年平均温度15.3℃,最热月(7月)平均温度24℃,最冷月(1月)平均温度4.6℃。春秋气温、晴雨多变,光、热、水同季,相对湿度大,无霜期270 d左右。土壤类型主要有黄红壤、黄壤、山地黄棕壤、山地草甸土等。代表性植物草本植物主要有菅草(*Themeda Minor*)、细柄草(*Capillipedium parviflorum*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、金茅(*Eulalia speciosa*)、野古草(*Arundinella hirta*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、小白酒草(*Conyza japonica*)、灰苞蒿(*Artemisia roxburghiana*)等。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地选择及调查方法

为了保证不同坡度与坡向的群落样地间具有可比性,在贵阳市环城高速南环线金竹立交处设为试验区(如图1),所选试验边坡距离不超过100 m范围之内,边坡植被建植于2009年5月开工,6月用三维网喷播技术施工完毕,客土主要为黄壤,土层厚10 cm,喷播物种有:刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、银合欢(*Leucaena glauca*)、伞房决明(*Cassia tora*)、木豆(*Cajanus cajan*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、白三叶(*Trifolium repens*)、高羊茅(*Festuca elata*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、野菊花(*Dendranthema indicum*)等。

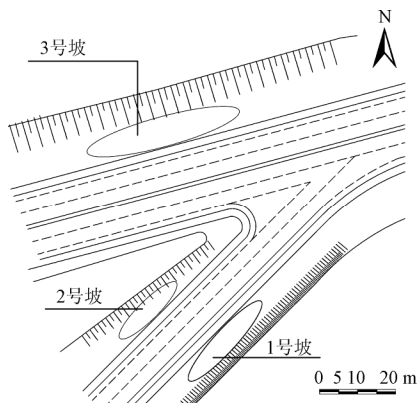


图1 样坡平面示意图  
Fig.1 Sample slopes plane schematic

本研究采用定位跟踪研究法;2009年7月在选定的

3个样坡(1号坡,坡向WN45°,坡度45°;2号坡,坡向ES45°,坡度51°;3号坡,坡向SE15°,坡度63°),每样坡随机确定12个1 m×1 m样方做为定位研究点,共36个样方。从2009年7月至2010年6月,每个月月上旬定时进行常规群落学调查,记录样方内物种数、每种植物盖度、高度、多度等。

#### 1.2.2 土壤样品采集及分析方法

由于边坡人工喷播植被土层较薄(≤10 cm),因此不做分层采样。与样方群落调查相结合,每月上旬在每个样坡的每个样方内,用土壤环刀随机取3个土样,带回室内进行土壤养分测定分析。采用常规土壤农化分析方法测定有机质、碱解氮、速效钾、有效磷含量。分析方法<sup>[16-17]</sup>:土壤有机质用重铬酸钾容量法、碱解氮用扩散吸收法、土壤有效磷用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法、速效钾用NH<sub>4</sub>OAc浸提-火焰光度法进行分析测定。

研究期内12个月的月平均气温和月总降雨量资料从贵阳市花溪区气象区获取(图2)。

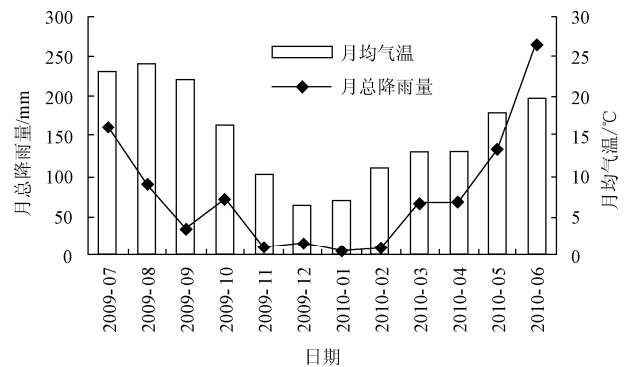


图2 月平均气温与月总降雨量  
Fig.2 Monthly average temperature and total rainfall

数据整理与分析运用Excel 2003和SPSS(16.0)统计软件。

## 2 结果分析

### 2.1 边坡植被群落与土壤养分变化特征

#### 2.1.1 植被群落变化特征

##### 1) 物种动态特征

群落的植被特征变化能够反应基质的质量状况与生产力,通过定点定期对群落数量特征的调查分析表明(图3a各边坡物种动态),随时间推移边坡植被物种发生着明显的季节性变化,越冬时期物种数最少,主要由于人工边坡植被群落物种主要以草本植物为主,草本植物在生长期结束时,其地上部分会枯死。植被建植初期的第1、2个月,1、2号坡高羊茅作为先锋物种迅速占据边坡植被空间,之后黑麦草逐渐占据优势,高羊茅从群落中退出;3号边坡建植伊始,黑麦草则表现出较为明显的优势地位。之后3个边坡均以黑麦草为优势草种,在群落中占据明显的优势,直至冬季枯黄期(2010年1—3月)黑麦草枯黄,返青后又迅速占有优势。喷播的其他物种中

白三叶草和入侵的当地乡土草种苜蓿 (*Medicago sativa*) 在冬季枯黄期取代黑麦草成为优势种, 其余时间二者表现为次优势物种。喷播物种中的刺槐、伞房决明、狗牙根、野菊花作为伴生种存在, 木豆在 2009 年 12 月全部死亡。当地乡土草种在建植后的不同时期入侵, 其中常见种有酢浆草 (*Oxalis corniculata*)、小白酒草 (*Comniza Canadensis*)、野苘蒿 (*Gynura crepidioides*)、早熟禾 (*Poa annua*) 等, 其余为偶见种, 主要集中在菊科和禾本科, 偶见十字花科、石竹科、苋科和毛茛科草种。3 个边坡植被物种变化动态有差异 ( $P < 0.01$ ), 在边坡植被建植初期第 1 个月, 1 号坡平均物种数即达 10 种, 多于 2 号坡 (3 种) 和 3 号坡 (6 种), 之后 6 个月内维持在较多的物种水平, 第 7 个月 (即 2010 年 1 月) 开始, 物种数锐减, 至第 9 个月 (2010 年 3 月) 达最低值 2 个物种, 之后逐月增加, 到第 12 个月 (2011 年 6 月) 恢复到 5 个物种。2、3 号边坡物种动态变化表现出较为一致的变化规律, 第 1 个月物种数相对较低, 第 2 个月增加到平均 9 个物种, 之后逐渐递减至第 7 个月到最低值, 2 号边坡为 1 个物种, 而 3 号边坡为 3 个物种, 之后物种数又开始递增。3 个边坡物种的变化差异可能与坡向有关, 在建植初期是研究区气温最高的时期, 受光照和气温的影响, 阳坡一般土壤含水率低于阴坡、土壤硬度大于阴坡<sup>[9]</sup>, 1 号边坡为阴坡相对于 2、3 (阳坡) 号坡有利于植物种萌发。

2) 群落盖度动态特征

本试验对边坡植被群落盖度分存活和枯死 2 部分统计。3 个边坡群落存活部分平均盖度都表现出随季节变化的动态特征 (图 3b 各边坡存活植物平均盖度动态), 在建植后第一个周年的春季 (2010 年 1—4 月) 3 个边坡的平均盖度均降至最低水平 (0.5%~11%), 5 月份突升, 并继续上升至 6 月份。2009 年 7—12 月, 3 个边坡之间群落存活部分平均盖度变化有显著差 ( $P < 0.01$ ), 1 号边坡从开始的 43% 低水平缓慢下降到第 3 月 (2009 年 10 月) 的 33%, 第 4、5 月 (2009 年 10 月、11 月) 突升到 61%; 2 号边坡建植初期 (2009 年 7 月、8 月) 处于高位水平 (90%), 第 3 月 (2009 年 10 月) 突降至 21%, 低于同期 1、3 号边坡, 第 4 月渐升至第 5 月出现一小峰值 (39%) 后又缓慢下降。3 号边坡建植后第 1—5 月, 群落存活部分平均盖度在 60%~64% 之间发生微小的波动, 第 6 月突降至 35%。3 个边坡坡向和坡度各不相同, 在夏、秋季光照天数较多, 各坡受光时间与强度不同, 可能是引起 3 个边坡在这一时间区间平均盖度的差异。2009 年 12 月—2010 年 6 月, 3 个边坡植被群落存活部分的平均盖度变化规律一致, 且相互之间的差异不明显, 这主要可能是因为整个春季, 研究区天气多以阴雨天为主, 各边坡光照影响不明显。

由图 3c 各边坡枯死植物平均盖度动态可以看出, 3

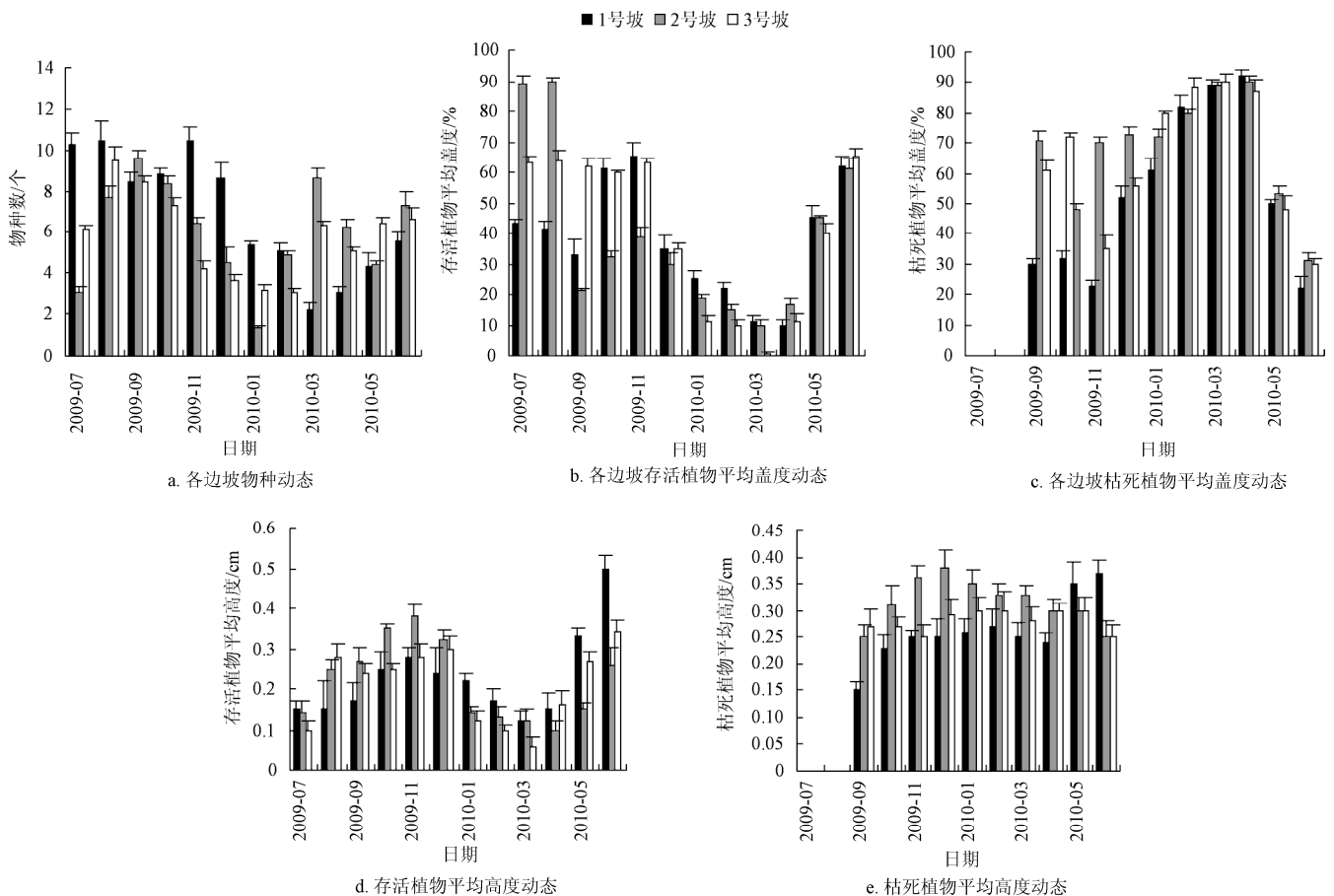


图 3 样坡植被群落数量特征变化图

Fig.3 Community quantity characteristics dynamics of slope vegetation

个边坡在植被建后的第1、2月未出现枯死植株,2009年9月至2010年2月,3个边坡植被群落枯死部分平均盖度变化存在显著差异( $P<0.01$ ),1号坡在低位发生微小的先升后降波动,从2009年11月至2010年2月,以较快的速度上升;2号坡这段时期一直在高位发生微小波动;3号坡有明显的先降后升变化,且变化幅度相对较大。2010年3月和4月,3个边坡植被群落枯死部分盖度同步达到最大值(87%~92%),之后同步变化,且相互之间差异不明显。可以看出在冬季末至整个春季边坡植被存在较长的枯黄期。

### 3) 群落高度动态特征

边坡植物群落的高度反应了植被恢复的水平与土壤肥力的高低。3个边坡植被群落存活部分的平均高度随时间进程表现出“升—降—升”的一致规律性(图3d存活植物平均高度动态),2009年11月出现峰值,2010年3月出现低谷值。2010年4月以后,1号坡存活物种平均高度增幅最大,3号坡次之,2号坡最小。图3e枯死植物平均高度动态表明:枯死植物平均高度基本维持在较高

的水平,1号坡枯死植物平均高度高2009年9月份最低,2009年9月至2010年4月在0.25 cm上下波动,2010年5、6月突升至0.35 cm以上。2号坡枯苗平均高呈先升(至2009年12月,平均苗高达0.38 cm)后持续缓慢下降。3号坡在0.25~0.30 cm之间上下波动。

对3个边坡植被建植第一周年群落存活物种平均高度进行时间序列的曲线估计,3个边坡群落苗高均符合3次幂函数,建立各边坡群落存活物种平均高度年变化方程如下,3个方程具有较明显的相似性。

$$H_1=0.205T-0.04T^2+0.002T^3-0.074 \quad R^2=0.817$$

$$H_2=0.279T-0.051T^2+0.003T^3-0.113 \quad R^2=0.857$$

$$H_3=0.238T-0.046T^2+0.002T^3-0.08 \quad R^2=0.767$$

式中, $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 分别为1、2、3号边坡存活物种平均高度(cm), $T$ 为建植后的月数

### 2.1.2 边坡植被土壤养分动态特征

从碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量变化趋势来看(图4),3个边坡均表现出了较为一致的变化趋势,但相互之间有差异( $P<0.01$ )。

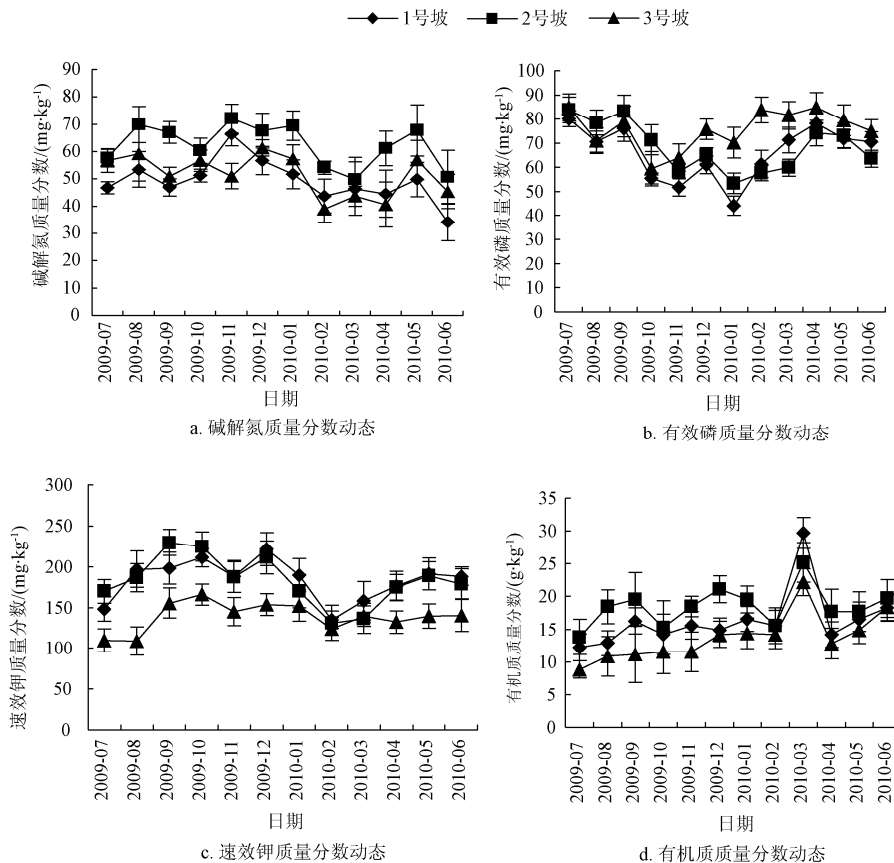


图4 边坡土壤养分动态特征

Fig.4 Dynamic characteristics of slope soil nutrients

土壤有效氮质量分数反映了近期内土壤氮素的供应状况。调查结果(图4a各边坡碱解氮质量分数动态)表明,在建植后7个月内,3个边坡土壤碱解氮质量分数上下波动变化,变化步调基本一致。之后的5个月表现为降—升—降的趋势,1、3号边坡在2010年2月达到低谷,此时1、3号边坡碱解氮质量分数分别为43.653和38.881 mg/kg,2号边坡在2010年3月达到低谷,碱解氮质量分

数为54.110 mg/kg,3个边坡在2010年5月均出现峰值,碱解氮质量分数分别为49.794,67.762和56.894 mg/kg。1周年后碱解氮质量分数与建植初(2009年7月)相比都有所下降,降幅分别为:26.98%、12.04%、20.03%。这可能因为在2010年6月,边坡植被全面返青进入下一轮快速生长期,致使土壤碱解氮含量的快速下降。

从有效磷的变化趋势图(图4b各边坡有效磷质量分

数动态)可以看出: 3 个边坡有效磷质量分数随时间的变化先出现波动下降区间, 1、2 号边坡在 2010 年 2 月达到低谷, 有效磷质量分数分别是 44.123 和 53.298 mg/kg, 之后至 2010 年 4 月, 以不同的速率上升到峰值(分别为 78.202 和 74.213 mg/kg)后 1 号坡变化微小, 2 号坡又明显下降。3 号边坡在 2009 年 10 月达到低谷, 有效磷质量分数为 59.401 mg/kg, 之后波动上升, 到 2010 年 2 月达到峰值(83.884 mg/kg)后上下微小波动。3 个边坡有效磷质量分数 1 周年后均比建植(2009 年 7 月)初低, 分别下降了 12.11%、24.17%和 4.38%。在建植初期前几个月, 由于植物的快速生长对磷元素的大量吸收而质量分数下降, 之后进入越冬时期, 植物进入枯黄期对磷元素的需求逐渐降低, 枯落物的不断增加, 加之气温回升土壤微生物的化学分解作用不断增强, 磷元素质量分数不断的上升。

3 个边坡速效钾随时间的变化特征亦较明显, 总体变化趋势基本一致, 但相互之间的差异亦显著(图 4c 各边坡速效钾质量分数动态)。3 个边坡速效钾质量分数在建植后 1 周年内同步出现了 2 个低谷, 第 1 个低谷在 2009 年 11 月, 此时速效钾的质量分数比建植初高, 第 2 个低谷出现在 2010 年 2 月, 3 个边坡速效钾质量分数相差不大, 此时 1、2 号坡速效钾质量分数比建植初低, 3 号坡比建植初高。在 1 周年变化过程中 1、2 号边坡出现了 3 个峰值, 第 1 个峰值不同步, 1 号坡在 2009 年 10 月, 2 号坡在 2009 年 9 月, 第 2、3 个峰值同步出现在 2009 年 12 月和 2010 年 5 月。3 号边坡只有 1 个明显的峰值, 出现在 2009 年 10 月份。1 周年后 3 个边坡速效钾质量分数均高于建植初(2009 年 7 月), 分别增加了: 27.01%、5.25%和 28.01%。钾元素质量分数的时间变异无法用植物生长吸收来解释, 可能存在更为复杂的影响因子。

3 个边坡 1 周年内有机质质量分数变化有差异, 但变化趋势仍然基本一致(图 4d 各边坡有机质质量分数动态), 在 2009 年的 7 月至 12 月, 1、3 号边坡在波动变化中缓慢上升, 2 号边坡波动幅度较大, 且在 2009 年 10 月出现了明显的低谷。2010 年 1 月 3 个边坡土壤有机质质量分数趋于相同后(15.538、15.538 和 14.187 g/kg)急剧上升, 到 2010 年 2 月, 均出现明显的峰值, 分别为: 29.724, 25.200 和 22.160 g/kg。2010 年 3 月, 同步急剧下降(14.187、17.697 和 12.835 g/kg)后缓慢上升。3 号边坡土壤有机质在 2010 年 3 月同步出现峰值, 与边坡植被群落特征有关, 由图 4b 各边坡存活植物平均盖度动态和图 4d 存活植物平均高度动态可以看出, 在此时, 存活部分的盖度和平均高度在经过 5 个月的持续降低后均处于最低值, 植物生长对有机质的消耗降到最低, 另外经过近 5 个月枯死植株的凋落物回馈土壤(图 3c 各边坡枯死植物平均盖度动态、图 3e 枯死植物平均高度动态表明), 使有机质质量分数突增。2010 年 4 月, 随群落生长量的明显增加, 又突然下降, 从而形成明显峰值。周年观测结束后, 1、2、3 号边坡土壤有机质质量分数比建植初期分别增加 49.6%、42.6%和 108.7%。

## 2.2 边坡与植被特征、降雨量及气温对土壤养分变化的影响分析

在自然状态下, 群落的数量特征不仅取决于群落的结构特征和功能, 还反映群落在演替过程中土壤特征和土壤资源的持续供给能力<sup>[18]</sup>。土壤中的养分含量及有机质含量的动态变化受到植物生长、大气降水和温度等多重因子的影响<sup>[16]</sup>。由于岩石边坡坡度大, 土层薄, 降雨、光照、气温等气象因素对边坡土壤养分状况会产生较为明显的影响。分析边坡植被群落特征、降雨量及气温对边坡土壤养分特征之间的相关关系, 用以解释和说明植被变化与土壤养分的时间变异的内在联系更有意义。采用逐步多元线性回归(stepwise)法分析了边坡植物群落特征与土壤因子的关系。从表 1 中可以看出, 有机质与群落数量特征、气象因子之间在 3 个边坡中均不存在线性相关关系, 说明在解释有机质变化时群落数量特征和气象因子相互之间存在较强的共线性, 影响了各因子对有机质变化贡献的显著分析。其余各土壤养分因子与植物数量特征和气象因子之间的相关性较为明显, 但 3 个边坡回归方程中相关的植物群落特征指标和气象因子各不相同。引起这种差异的原因可能是由于 3 个样坡之间的坡向与坡度两两各不相同, 由此产生了一系列如边坡土壤结构、土壤理化性质及土壤微生物等更为复杂的交互影响关系。说明本文对影响边坡这一特殊生境的土壤

表 1 边坡土壤养分与植被特征、降雨量及气温响应关系回归分析

Table 1 Regression analysis of soil nutrients with community characteristics of vegetation, rainfall and temperature					
样地号	土壤因子	多元回归方程	R <sup>2</sup>	F	P
1 号坡	碱解氮 (AN)	$AN=91.656-0.605x_3-174.561x_4+174.955x_5-0.996x_7$	0.842	6.663	0.031
	有效磷 (AP)	$AP=55.037-0.339x_2+0.039x_6+1.378x_7$	0.693	5.602	0.036
	速效钾 (AK)	$AK=216.733-0.584x_3$	0.401	5.361	0.049
	有机质 (OM)	0	0	0	0
2 号坡	碱解氮 (AN)	$AN=50.048+0.529x_2-0.094x_6$	0.638	6.157	0.029
	有效磷 (AP)	$AP=30.857+0.169x_2+1.55x_7$	0.617	5.647	0.035
	速效钾 (AK)	$AK=110.112+213.592x_4+1.873x_7$	0.580	4.833	0.048
	有机质 (OM)	0	0	0	0
3 号坡	碱解氮 (AN)	$AN=-18.035+6.158x_1-0.403x_3+328.072x_5-2.341x_7$	0.840	6.567	0.032
	有效磷 (AP)	$AP=173.517-5.52x_1-1.207x_2+198.135x_4-423.419x_5-0.095x_6+4.285x_7$	0.951	9.746	0.044
	速效钾 (AK)	$AK=130.599+0.665x_1+0.286x_2-3.917x_7$	0.767	6.567	0.025
	有机质 (OM)	0	0	0	0

注: 表中  $x_1$  为物种数;  $x_2$  为存活部分平均盖度;  $x_3$  为枯死部分平均盖度;  $x_4$  为存活植株平均高度;  $x_5$  为枯死植株平均高度;  $x_6$  为月总降雨量;  $x_7$  为月均气温; 0 为表示回归过程中没有变量进入方程。

养分变异规律的因素考虑不够,这在今后研究中须进一步讨论。另外,在此基础上继续进行定位定期取样调查研究,更有利于分析多个生长周期中边坡植被群落因子与边坡土壤养分因子之间的响应关系,为岩石边坡植被恢复提供可靠理论依据。

### 3 讨论

1)速效态土壤养分质量分数与植物生长密切相关,决定了土壤短期内对植物的养分供给状况<sup>[19]</sup>。牛海波等<sup>[5]</sup>在植被混凝土肥力水平变化研究中得出各肥力因子隔年变化中,土壤有效氮元素流失明显,与本研究结果碱解氮质量分数隔年降低相同。与之不同之处在于本研究表明有效磷元素质量分数亦隔年降低。速效钾质量分数与有机质质量分数在发生了年内动态变化后表现为隔年增加,其中有机质质量分数的增加幅度很大。土壤养分受多因素影响,需要从植被状况、环境因子、酶活性和微生物等各方面全面研究。本研究仅限于边坡植被群落特征和降雨量及气温等因素进行了12个月的定期研究,研究结果反映了人工边坡植被建植初期群落与土壤养分的变化规律,其内在机理分析有待进一步研究。

2)植被数量特征与土壤养分之间存在着必然的关系,基质植被系统的养分元素不仅在系统内部通过植被的吸收利用与归还补偿进行循环外,还通过生物地球化学循环与系统外大环境进行交流<sup>[11]</sup>。本文试图通过多元逐步回归分析解释边坡植被群落数量特征与部分土壤养分因子之间的相关关系,除有机质与植被群落数量特征非线性回归关系外,其余速效态的土壤元素均有一定的多元线性关系,然而边坡之间的同一土壤养分因子与植被群落特征相关指标之间的相关性差别较大,无法形成统一的解释方程。这一结果主要原因在于本研究所选样坡之间存在着坡向与坡度两个因素的差别,而这2个因素对于坡面受光、土壤含水率及其他生态因子具有交互影响作用。

### 4 结论

边坡人工植被建植1周年内,边坡植被群落物种、盖度和高度均有明显的规律性变化,物种数量与盖度整体上存在明显的“U”型变化规律,在1—3月群落平均物种数和盖度最低。从9月份开始出现植物枯黄现象,一直持续到第2年6月份。群落存活部分平均高度符合3次幂函数,变化趋势呈倒“S”型。本试验边坡植被群落主要由草本植物构成,受季节性调整出现枯黄、越冬、返青等正常的变异现象,到第2年6月份基本达到建植初期状态,边坡植被恢复的效果及其发展变化趋势需继续观测研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈英义,李道亮.基于Web-GIS和RS的煤矿废弃地植被恢复空间决策支持系统[J].农业工程学报,2008,24(10):63—67.
- [2] Donald H.G., Robbin B.S. Biotechnical stabilization of high way cut slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(9): 1395—1409.
- [3] 罗志军,赵小敏,刘耀林.基于遥感的三峡库区植被覆盖度动态监测[J].农业工程学报,2008,24(增刊1):57—60. Luo Zhijun, Zhao Xiaomin, Liu Yaolin. Dynamic monitoring of vegetation fraction based on remote sensing in Three Gorge area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(Supp.1): 57—60. (in Chinese with English abstract)
- [4] 方海兰,陈玲,黄懿珍,等.上海新建绿地的土壤质量现状和对策[J].林业科学,2007,43(增刊1):89—93. Fang Huilan, Chen Ling, Huang Yizhen, et al. Current situation and strategy for the soil quality of newly-established green belts in Shanghai[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(Supp.1): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [5] Ursino N, Contarini S. Stability of banded vegetation patterns under seasonal rainfall and limited soil moisture storage capacity[J]. Advances in Water Resources, 2006, 10(29): 1556—1564.
- [6] 张俊云,周德培,李绍才.岩石边坡生态护坡研究简介[J].水土保持通报,2000,20(4):362—238. Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Brief introduction of study on slope eco engineering for rock slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(4): 362—238. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李绍才,孙海龙.中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J].资源科学,2004,26(8):612—266. Li Shaocai, Sun Hailong. Developing trend and situations of technique to stabilize rock slope with vegetative cover in China[J]. Resources Science, 2004, 26(8): 612—266. (in Chinese with English abstract)
- [8] 周跃.植被与侵蚀控制:坡面生态工程基本原理探索[J].应用生态学报,2000,11(2):292—300. Zhou Yue. Vegetation and erosion control: exploration on basic principle of slope engineering[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 292—300. (in Chinese with English abstract)
- [9] 牛海波,许文年,夏振尧,等.植被混凝土肥力水平变化研究[J].中国水土保持,2010(2):36—38.
- [10] 舒安平,苏建明,冷剑,等.半干旱区生态护坡工程客土养分衰减特征与恢复趋势[J].水土保持学报,2008,22(5):82—90. Shu Anping, Su Jianming, Leng Jian, et al. Decaying properties and restoring tendency about nutrient components of spraying-earth among the ecological slope protection in the semi-arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 82—90. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.岩石边坡基质—植被系统的养分循环[J].北京林业大学学报,2006,28(2):85—90. Li Shaocai, Sun Hailong, Yang Zhirong, et al. Nutrient cycling in substrate-vegetation systems of rock slopes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 85—90. (in Chinese with English abstract)

- [12] 张展, 高照良, 宋晓强, 等. 黄延高速公路边坡植被与土壤特性调查研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 191—195.  
Zhang Zhan, Gao Zhaoliang, Song Xiaoliang, et al. Investigation of slope vegetation and soil properties on the Huangling—Yan'an Highway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 191—195. (in Chinese with English abstract)
- [13] 余海龙, 顾卫, 殷秀琴, 等. 高速公路路域边坡人工植被下土壤质量的变化[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 32—36.  
Yu Hailong, Gu Wei, Yin Xiuqin, et al. Changes of soil quality on expressway side slope as impacted by artificial vegetation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [14] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 14—18.  
Kong Gang, Wang Quanjiu, Fan Jun. Research on nutrient loss from loessial soil under different slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘大翔, 许文年, 周明涛, 等. 坡位坡向及年限对黄龙滩电站生态护坡肥力的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 178—182.  
Liu Daxiang, Xu Wennian, Zhou Mingtao, et al. Effects of slope positions and directions and years on fertility of ecological protected-slopes in huanglongtan hydropower station[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 178—182. (in Chinese with English abstract)
- [16] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 202—205.  
Luo Dongqi, Bai Jie, Xie Deti. Research on evaluation norm and method of soil fertility[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 202—205. (in Chinese with English abstract)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 等. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426—2431.  
Wang Changling, Cao Guangmin, Wang Qilan, et al. Characteristics of artificial grassland plant communities with different establishment duration and their relationships with soil properties in the source region of Three Rivers in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2426—2431. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨丁丁, 罗承德, 宫渊波, 等. 退耕还林区林草复合模式土壤养分动态[J]. 林业科学, 2007, 43(增刊 1): 101—105.  
Yang Dingding, Luo Chengde, Gong Yuanbo, et al. The dynamic of soil nutrient under forest and grass composite pattern in area of conversion of farmland to forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(Supp.1): 101—105. (in Chinese with English abstract)

## Characteristics and soil nutrient dynamics in beginning period of artificial vegetation on rock slope

Wang Zhital<sup>1,2</sup>, Li Yi<sup>1\*</sup>, Wang Zhijie<sup>3</sup>

(1. Forestry College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Forestry College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, 712100 China)

**Abstract:** In order to understand the vegetation characteristics and nutrient variation in the beginning period of ecological protection engineering on the rock slope, taking an actual project as study case, the location study method was adopted to investigate the main community characteristics such as species composition, coverage and height, and soil nutrient factors such as organic matter and available nutrient elements on three slopes with different aspect and gradient in the first year after vegetation planted. Results showed that: 1) During the first year since artificial vegetation planted, there was significant seasonal changes on quantitative characteristics of plant communities. The number of species was more in the beginning period, then reached the minimum in the winter and spring, while gradually increasing after returning green in the second year. On the three slopes, the average coverage of live parts declined to the minimum in the winter and spring, and increased suddenly with the temperature increasing in May. After a year of planting, the average coverage was similar to each other with a value of about 60%. The average height of live parts of the vegetation changed with time and the variation was accorded to cubic power function. 2) The changing tendency of soil available nutrients and organic matter were similar in the three slopes during the first year. But there were obvious differences between each other. Content of available nitrogen and phosphorus decreased in the end of year, but the available nitrogen and organic matter increased. 3) By the multiple stepwise regression analysis, excluding organic matters of three slopes, other soil available elements showed multiple linear relationship with vegetation community characteristics. While the same soil nutrient factor and the matched indicator of vegetation community characteristics varied greatly among different slopes and they could not form a unified equation of interpretation. So more influence factors and interactive relationships should be considered synthetically in the follow-up studies.

**Key words:** soil, nutrients, vegetation, rock slope, beginning period of planting, plant characteristics