

岩石边坡植被恢复初期土壤养分特征及其影响因素

马帅帅¹, 王英宇², 宋桂龙¹, 徐洪雨¹, 王峰², 刘小鸿²

(1. 北京林业大学 草坪研究所, 北京 100083; 2. 北京市京石园林绿化有限公司, 北京 100026)

摘要: 以北京—承德(简称京承)高速公路(3期)边坡 3a 恢复期植被为研究对象,对土壤养分状况进行了调研,并分析了影响养分变化的主要因素。结果表明,pH 值绝大部分在 6.5 左右,86.73% 边坡的有机质含量和 88.78% 边坡的全氮含量都处于中上水平,90.82% 边坡的速效磷含量处于较丰富水平,73.74% 边坡的速效钾含量处于中下水平,表明在目前施工技术及养护条件下,速效钾成为植物生长的关键养分因子。影响因素中,坡质、坡向和施工工艺对基质养分含量影响较大。

关键词: 京承 3 期高速公路; 边坡; 植被恢复; 养分特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0024-05

中图分类号: S688.4

Soil Nutrient Characteristics and Their Influence Factors in Vegetation Restoration on Rocky Slope

MA Shuai-shuai¹, WANG Ying-yu², SONG Gui-long¹, XU Hong-yu¹, WANG-Feng², LIU Xiao-hong²

(1. Key Institute of Turfgrass Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Jingshi Landscaping Co., Ltd, Beijing 100026, China)

Abstract: Regarding the vegetation recovered for 3 years on Beijing—Chengde third-phase freeway slopes as the study object, we conducted an investigation of soil nutrient status and analyzed the main factors affecting soil nutrients. Results showed that soil pH values were mostly about 6.5; soil organic matter contents on 86.73% of the slopes and total nitrogen contents on 88.78% of the slopes, in upper level; available phosphorus contents on 90.82% of the slopes, in rich level; and available potassium contents on 73.74% of the slopes, in low-middle level. This indicated that available phosphorus was the key nutrient factor for plant growth under the current construction techniques and curing conditions. Slope material, slope direction and construction techniques had more effects on total nutrient content on the slopes.

Keywords: Beijing—Chengde third-phase expressway; slope; vegetation restoration; nutrient characteristic

土壤为植物生长之本,是边坡生态恢复植被生长的介质和养分的直接供给者,只有充分了解高速公路边坡土壤的肥力状况,并结合边坡防护植物营养以及功能需求特性,再对现有土壤进行合理的改良,创造良好的边坡土壤环境,满足边坡植物生长的基本需要,才能达到边坡生态防护的长效性、持久性和稳定性^[1-5]。余海龙等^[6]对边坡植被恢复后土壤质量包括物理因子、化学因子和生物因子做了详细的研究,发现土壤中的有机质、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。王志泰等^[7]通过对贵阳市环城高速南环线金竹立交边坡调查研究发现,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;另外,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,但不同元素间也存在明显差异。张展等^[8-9]对黄延高速公路边坡植被和土壤养分进行了调研,结果表明,土壤肥力与植被恢复是相辅相成的,土壤肥力随人工植被建立时间的延长而逐渐恢复,随着时间的推移,植被物种数目和比例也发生较大变化,有利于护坡植物群落最终实现结构稳定。舒安平等^[10]通过对济青南线高速公路部分石质客土喷播生态防护边坡的试验研

收稿日期:2012-06-26

修回日期:2012-08-07

资助项目:交通运输部科技项目“京承高速公路(沙峪沟—市界段)边坡综合防护及治理技术研究”(2009353311050);国家林业局林业科学技术推广项目“裸露坡面植被恢复综合技术示范推广”(201131)

作者简介:马帅帅(1988—),男(汉族),山东省临朐县人,硕士,研究方向为植被恢复理论与技术。E-mail:ma20062968@163.com。

通信作者:宋桂龙(1976—),男(汉族),河北省沧州市人,博士,副教授,主要研究方向为草坪科学与管理、植被恢复理论与技术。E-mail:sihan@163.com。

究发现,有机质和碱解氮含量在初期随着时间的延长出现了不同程度的衰减特征,而有机质的衰减期要比碱解氮的长,另外随着植被落叶等自身有机物质的分解和养分补给,边坡植被营养的自给与客土养分的恢复是可以预期的。陈友光等^[11]对广东高速公路生态防护边坡土壤肥力的调查发现,酸性土壤有机质不足,普遍缺氮,严重缺磷,部分缺钾,氮、磷、钾比例严重失调;针对土壤养分严重不足的情况,提出改良对策:增施有机质,调节客土层 C/N 比,调整 pH 值,施加钙镁磷肥(尤其是强酸性土壤)或者过磷酸钙增加磷肥,添加适量草木灰以增加钾肥等。植被恢复后的边坡土壤养分变化特征已经成为国内外学者的热点研究对象^[4-9],但以往研究集中于植被恢复初期养分含量及成分的变化特征,而对影响因素的研究与探讨鲜有报道。本文就北京地区高速公路生态植被恢复 2~3 a 的边坡进行了土壤养分调研,分析影响土壤养分的重要因素,并结合边坡植被对土壤肥力的需求特征,提出一些相应的改良措施,为北京地区裸露边坡生态防护提供一定的理论依据。

1 研究区概况

研究依托京承高速公路(3期)(沙峪沟—市界),沙峪沟至市界段位于北京市密云县东北部山区,起于密云县穆家峪镇沙峪沟,与京承2期相接,止于京冀交界处司马台,与京承高速河北承德段相接,全长 62.7 km。密云县是山区县,地处华北平原与蒙古高

原的过渡地带,海拔在 45~1 735 m,边坡坡度一般为 40°~70°。

京承高速公路(3期)边坡植被恢复主体工程于 2009 年底全部完成,涉及到的施工工艺主要有厚层基材喷播技术、客土喷播技术、生态袋技术(鑫三角)、框格+植生袋技术等,主要工艺是厚层基材喷播和客土喷播技术^[12-15]。植物配置选择以灌木为主,草本为辅,辅以草花的配置模式。植被恢复工程所选用的植物物种主要有:刺槐、榆树、臭椿、紫穗槐、胡枝子、荆条、锦鸡儿、沙打旺、紫花苜蓿、小冠花、波斯菊等。京承高速公路(3期)植被恢复边坡在 2 a 的养护过程中,一直采用施氮肥 10 g/(m²·a)的施肥对策。

2 研究方法

研究对象为京承高速公路(3期)边坡植被恢复工程 K70+500—K129+200 段 98 个边坡的基质养分状况,试验时间为 2011 年 10 月至 11 月。

每个边坡随机选取 3 个点取样混合(采样深度为 10 cm),带回实验室风干、磨细、过筛,测定 pH 值、有机质、全氮、速效磷、速效钾。pH 值采用蒸馏水浸提—电位法;有机质采用重铬酸钾—外加热法;全氮采用开氏定氮法;速效磷采用钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度计法^[16]。

分析单一因素的影响时,选择其他因素基本一致的边坡进行统计分析。主要影响因素分析条件如表 1 所示。

表 1 岩石边坡影响因素及其分析条件

序号	影响因素	分类	分析条件
1	坡质	岩石坡/土石坡	厚层基材喷播技术、阴坡、缓坡、乔灌木盖度在 50%以上
2	坡度	陡坡(>45°)/缓坡(≤45°)	厚层基材喷播技术、岩石—阴坡、乔灌木层盖度在 50%以上
3	坡向	阳坡、阴阳坡和阴坡	厚层基材喷播技术、岩石—陡坡、乔灌木层盖度在 50%以下
4	乔灌木植被特征	>50%和≤50%	厚层基材喷播技术、岩石—阴—陡坡
5	施工工艺	厚层基材/客土喷播	岩石—陡坡、阴坡、乔灌木层盖度在 50%以下

3 结果与分析

3.1 京承高速公路(3期)边坡基质养分现状

参照 2001 年土壤养分含量全国统一分级标准(表 2),对京承高速公路(3期)边坡基质养分调查结果进行分级分析,结果如表 3 所示。土壤有机质是土壤固相的一个重要组成部分,在土壤养分循环和养分有效化中起着重要作用^[17]。经调查,边坡有机质含量处于 4.64~72.08 g/kg。其中,达到丰富水平的边坡数占调查边坡总数的 25.51%,达到中上水平边坡数占调查边坡总数的 86.73%,只有 2.04%的边坡处

于缺乏状态,有机质含量最高 2 个边坡分别达到了 72.08 和 63.18 g/kg,有机质含量最少的 2 个边坡都采用框格+植生袋技术,分别为 4.64 和 7.26 g/kg,这是植被恢复建植时施工工艺的试验边坡。植被恢复初期有机质含量与施工基质材料配比有着直接关系,目前岩石边坡植被恢复多采用厚层基材喷播技术(也称有机质喷播技术),有机质含量一般都在 40%~50%,有机质含量为植被恢复初期植物养分的主要来源。结果表明,有机质含量整体处于中上水平,客土中有机质的设计比例较高,可满足植被恢复初期乃至未来一段时间植被生长的需要。

表 2 2001 年土壤养分含量全国统一分级标准

分级	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
丰富	>40	>2	>40	>200
较丰富	30~40	1.5~2.0	20~40	150~200
中上	20~30	1.0~1.5	10~20	100~150
中下	10~20	0.8~1.0	5~10	50~100
缺	6~10	0.5~0.8	3~5	30~50
极缺	<6	<0.5	<3	<30

表 3 调查边坡中基质养分所属各养分分级的数量 个

分级	有机质	全氮	速效磷	速效钾
丰富	25	10	36	0
较丰富	24	26	53	0
中上	36	51	6	20
中下	11	7	3	72
缺	2	2	0	6
极缺	0	2	0	0

全氮含量处于 0.12~11.05 g/kg, 其中, 达到丰富水平的边坡比例为 10.20%, 达到中上水平的边坡数占调查边坡总数的 88.78%, 全氮含量处于缺乏以下水平的边坡数只占 4.08%, 含量最高的 3 个边坡分别达到了 11.05, 9.98 和 7.38 g/kg, 含量最低的 2 个边坡分别为 0.31 g/kg 和 0.12 g/kg。在植被恢复 2 a 养护期内一直施氮肥 10 g/(m²·a), 另外大量豆科植物的固氮作用也有利于提高土壤的全氮含量。结果表明, 全氮含量整体处于中上水平, 能够满足植

物的生长需求。

经调查, 速效磷含量处于 8.07~87.72 mg/kg。达到丰富水平的边坡比例为 36.73%, 达到较丰富水平的边坡比例为 90.82%, 处于中等水平的边坡比例为 9.18%, 全部坡面的速效磷含量都在中等水平以上。含量最高的 3 个边坡分别达到了 87.72, 86.39 和 83.19 mg/kg, 含量最低的 3 个边坡分别达到 8.4, 8.6 和 8.07 mg/kg。结果表明, 速效磷含量整体处于较丰富水平。

京承高速公路(3 期)边坡基质中速效钾含量处于 42.91~163.3 mg/kg。93.88% 的边坡达到中等水平, 但是处于中下水平的边坡比例为 73.47%, 另外还有 6.12% 的边坡速效钾含量处于缺乏状态。含量最高的 3 个边坡分别达到了 163.3, 157.8 和 144.9 mg/kg, 含量最低的 2 个边坡分别为 42.91 和 44.18 mg/kg。结果表明, 速效钾的含量整体处于中下水平。

分析表明, 京承高速公路(3 期)边坡基质养分总体现状为 pH 值在 6.5 左右显弱酸性, 有机质含量、全氮处于中上水平, 速效磷含量处于较丰富水平, 速效钾含量处于中下水平。

3.2 影响边坡基质养分的主要因素

根据表 1 所示的坡质、坡向、坡度、乔灌木植被特征和施工工艺划分边坡类型, 依据不同类型边坡的分析条件对基质养分特征进行分析, 结果如表 4 所示。

表 4 不同类型边坡基质养分特征

边坡类型	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
岩石坡	6.57	38.74	1.54	32.99	82.22
土石坡	6.37	34.06	1.31	28.91	68.93
陡坡	6.36	36.06	1.53	30.26	63.57
缓坡	6.46	37.57	1.48	33.48	78.08
阴坡	6.37	36.19	1.39	31.09	81.53
阴阳坡	7.17	35.49	1.46	39.88	79.91
阳坡	6.63	33.64	1.54	32.30	102.70
乔灌木盖度 50% 以下	6.36	38.14	1.49	32.82	84.24
乔灌木盖度 50% 以上	6.44	37.68	1.57	31.56	76.06
客土	6.63	23.28	1.06	31.97	74.59
厚层	6.57	36.77	1.56	33.24	88.17

3.2.1 坡质 选择同时为厚层喷播施工, 立地类型为阴坡—缓坡, 乔灌木盖度 50% 以上的 2 种类型边坡——岩石坡和土石坡, 对此 2 种类型边坡基质养分特征进行对比, 以此分析坡质对基质养分的影响。

由表 4 可以看出, 岩石坡基质养分含量明显大于土石坡基质养分, 其中差异最明显的养分指标是速效钾, 其余依次是全氮、速效磷和有机质。岩石坡和土石坡基质速效钾的含量分别为 82.22 和 68.93 mg/kg,

均处于中下水平; 岩石坡基质全氮含量(1.54 g/kg)处于较丰富水平, 而土石坡基质的全氮含量(1.31 g/kg)处于中上水平; 2 类边坡有机质含量和速效磷含量都处在较丰富水平。岩石边坡与土石边坡最大的区别在于客土基质与原有坡面之间的物质循环特征存在一定差异, 土石边坡基质中的养分物质更容易与原有边坡土壤发生物质循环和交换, 这可能是土石边坡主要养分指标含量低于岩石坡的主要原因。

3.2.2 坡度 选择同时为厚层喷播、立地类型为岩石—阴坡、乔灌木层盖度 50% 以上的 2 种类型边坡——陡坡(50°)和缓坡(40°),对 2 种类型边坡基质养分进行对比,以此分析坡度对边坡基质养分的影响。

由表 4 可以看出,陡坡和缓坡基质有机质含量分别为 36.06 和 37.57 g/kg,速效磷含量分别为 30.26 和 33.48 mg/kg,2 种养分含量都处在较丰富水平;陡坡基质的全氮含量为 1.53 g/kg 处于较丰富水平,缓坡基质的全氮含量为 1.48 g/kg 处于中上水平;陡坡和缓坡基质的速效钾含量分别为 63.57 和 78.08 mg/kg,均处于中下水平。陡坡和缓坡 2 种类型边坡的基质养分有所差异,整体来看缓坡的基质养分含量稍高。缓坡的基质养分速效钾和速效磷比陡坡高,特别是速效钾含量高出 22.83%,而有机质和全氮含量却差异不大。土壤养分降低与水土流失有密切的关系,而坡度升高是造成径流量增大的主要原因^[17]。速效磷和速效钾都易溶于水,极易随径流流失,因此坡度对这 2 种养分含量的影响较大。

3.2.3 坡向 选择同时为厚层喷播施工、岩石—陡坡、乔灌木层盖度 50% 以下的 3 种坡向边坡——阳坡、阴阳坡和阴坡,对 3 种类型边坡基质养分特征进行比较,以此分析坡向对基质养分的影响。

由表 4 可以看出,阴坡、阴阳坡和阳坡的基质有机质含量分别为 36.19,35.49 和 33.64 g/kg,速效磷含量分别为 31.09,39.88 和 32.30 mg/kg,2 种养分含量都处在较丰富水平;阴坡和阴阳坡的全氮含量分别为 1.39 和 1.46 g/kg 均处于中上水平,而阳坡全氮含量 1.54 g/kg 处于较丰富水平;阴坡和阴阳坡的速效钾含量分别为 81.53 和 79.91 mg/kg 均处于中下水平,阳坡的速效钾含量为 102.70 mg/kg 均处于中上水平。坡向对主要基质养分指标影响趋势差异显著,有机质含量表现为阴坡>阴阳坡>阳坡,这与许多国内外学者的研究一致,但全氮含量趋势与有机质含量正好相反,2 个指标差异较小;速效磷含量阳坡和阴阳坡均高于阴坡,以阴阳坡最高,速效钾含量阳坡明显高于阴坡和阴阳坡,速效磷和速效钾含量的差异较大。坡向主要影响土壤中的速效钾和速效磷,这可能是阴坡水分含量较高,速效钾和速效磷以及部分全氮养分易溶于水中,更容易被植物吸收利用,因此阴坡的速效钾和速效磷含量以及全氮相对较低。

3.2.4 乔灌木层盖度 乔灌木层盖度在一定程度上能反映边坡植被恢复的效果,故选择同时为厚层喷播施工、立地类型为岩石—阴—陡坡的 2 种不同乔灌木层盖度的边坡——大于 50% 和小于 50%,对这 2 种类型边坡基质养分特征进行比较,以此分析不同植被

恢复效果对边坡基质养分的影响。

由表 4 可以看出,乔灌木盖度 50% 以下和 50% 以上边坡基质有机质含量分别为 38.14 和 37.68 g/kg,速效磷含量分别为 32.82 和 31.56 mg/kg,都处在中上水平以上;乔灌木盖度 50% 以下边坡基质全氮含量为 32.82 g/kg,而 50% 以上边坡为 31.56 g/kg;乔灌木盖度 50% 以下和 50% 以上边坡基质速效钾的含量分别为 84.2 和 76.06 mg/kg 处于中下水平。2 种盖度类型边坡基质养分含量有所差异,乔灌木层盖度 50% 以下边坡有机质含量、速效磷和速效钾含量均高于盖度 50% 以上边坡,全氮含量趋势相反。除了乔灌木盖度 50% 以下边坡速效钾含量比 50% 以上高出 10.75% 外,其余几个指标差异均不明显。乔灌木层盖度 50% 以上边坡由于木本植被多对基质养分利用多,植被恢复仅仅 2~3 a 枯落物的养分归还还不明显,因此此类型边坡基质的有机质、速效磷和速效钾含量相对较低;由于植被盖度高能减少养分流失,另外边坡植被恢复的植物大部分是豆科植物,有一定的固氮能力,因此乔灌木层盖度 50% 以上边坡基质的全氮含量相对较高。

3.2.5 施工工艺 选择同时为阴坡、岩石—陡坡、乔灌木层盖度 50% 以下的 3 种坡向边坡——厚层基材喷播和客土喷播边坡,对 2 种类型边坡基质养分特征进行比较,以此分析施工工艺对基质养分的影响。

如表 4 所示,客土喷播边坡基质的有机质、全氮和速效磷含量都在中上水平以上,而厚层基材喷播方式的相应养分含量都达到了较丰富水平,但 2 种施工工艺边坡的有效钾含量都在中下水平。结果显示,厚层基材喷播方式基质各项养分指标均明显高于客土喷播,其中有机质含量高出 57.95%,全氮含量高出 47.17%,速效钾和速效磷含量相对较高。厚层基材喷播材料的主要成分是养分含量较高的基质如泥炭等,客土喷播材料的主要成分是养分含量相对较低的当地土壤,故厚层基材喷播边坡的养分要明显的高。

4 结论

(1) 研究表明,京承高速公路(3 期)生态植被恢复边坡土壤显弱酸性,pH 值绝大部分在 6.5 左右,有利于北方地区的植物吸收土壤养分^[8];86.73% 的边坡有机质含量和 88.78% 的边坡全氮含量都处于中上水平,90.82% 的边坡速效磷含量处于较丰富水平;73.74% 边坡的速效钾含量处于中下水平,只有 20.41% 边坡处于中上水平。目前,大部分边坡的土壤有机质、全氮、速效磷含量都能满足植被生长的正常需求,速效钾含量相对较低,如不及时追施钾肥,将

有可能出现速效钾养分含量不足的状况。

(2) 通过单因素分析法分析了影响边坡基质养分的几个重要因素:坡质、坡向、坡度、乔灌木层盖度和施工工艺,其中坡质、坡向和施工工艺对边坡基质总体养分含量影响较大。岩石边坡土壤养分含量明显高于土石边坡,土石边坡原有的土壤稀释了喷播基质中的养分;土壤养分含量受坡向影响是因日照情况和水分蒸散差异不相同而引起的^[18],有机质含量表现为阴坡>阴阳坡>阳坡,但全氮含量趋势与有机质含量正好相反,速效磷含量阳坡和阴阳坡均高于阴坡,以阴阳坡最高,速效钾含量阳坡明显高于阴坡和阴阳坡;厚层基材喷播方式基质养分各项指标均高于客土喷播,其中有机质含量最明显,其次是全氮含量,速效钾和速效磷含量相对较高,这是由于客土喷播材料中含有养分含量相对较低的当地土壤,故养分含量相对较低。坡度主要影响速效钾和速效磷,特别是易溶于水的速效钾含量,这是坡度升高增大边坡径流的结果。乔灌木盖度对土壤养分的影响比较复杂,乔灌木盖度高的边坡消耗的基质养分多,植被恢复仅仅 2~3 a 枯落物的养分归还还不明显,因此此类型边坡基质的有机质、速效磷和速效钾含量相对较高;另外边坡植被多为豆科植物都有一定的固氮能力,因此乔灌木层盖度 50%以上边坡基质的全氮含量相对较高。

影响边坡土壤有机质含量的主要因素是坡向和施工工艺,阴坡和阴阳坡明显大于阳坡,厚层基材喷播明显大于客土喷播;坡质、乔灌木盖度和施工工艺是影响全氮含量的 3 个主要因素,岩石坡明显高于土石坡,乔灌木盖度 50%以上明显高于 50%以下,厚层基材喷播明显大于客土喷播;坡度、坡向和施工工艺是影响速效磷含量的 3 个主要因素,阳坡和阴阳坡明显高于阴坡,缓坡明显高于陡坡,厚层基材喷播明显大于客土喷播;几乎全部的影响因子都对速效钾含量有很明显的影响,岩石坡明显高于土石坡,阳坡和阴阳坡明显高于阴坡,缓坡明显高于陡坡,乔灌木盖度 50%以下明显高于 50%以上,厚层基材喷播明显大于客土喷播。

(3) 基质养分调查表明,边坡基质养分现状为有机质含量、全氮处于中上水平,速效磷含量处于较丰富水平,速效钾含量处于中下水平。目前,施肥对策为施氮肥 10 g/m²,总的来说适宜性较好,但边坡在以后的养护过程中需要补充钾肥,建议施肥量在 7~15 g/m²。文中对不同立地类型、不同乔灌木盖度、不同施工工艺对边坡基质养分的影响进行了分析讨论,得出对具有以下特征的边坡进行钾肥补充过程中,补充的力度要稍大一些:土石边坡、陡坡、阴阳坡、乔灌

木层盖度 50%以上的边坡、采用客土喷播施工工艺的边坡。

[参 考 文 献]

- [1] 史玲. 保龙高速公路边坡植被恢复效果评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [2] 余海龙,顾卫,姜伟,等. 高速公路路域土壤质量退化演变的研究[J]. 水土保持学报,2006,20(4):195-198.
- [3] 刘鑫,满秀玲,陈立明. 坡位对小叶杨人工林生长及土壤养分空间差异的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(5):76-81.
- [4] 张磊,程温莹,罗丽. 黄塔(桃)高速公路边坡土壤营养元素分布特征[J]. 四川理工学院学报,2008,21(6):117-120.
- [5] 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):215-221.
- [6] 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]. 水土保持学报,2008,28(6):32-36.
- [7] 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.
- [8] 乔领新,刘荣堂,宋桂龙,等. 高速公路岩质边坡植被恢复初期喷播基材养分动态[J]. 草业科学,2011,28(12):2123-2127.
- [9] 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.
- [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.
- [11] 陈友光,陈振雄,柯玉诗,等. 广东地区高速公路边坡生态防护的土壤费用调查和改良对策[J]. 公路,2008,6(6):200-203.
- [12] 余君,王保龙,孙晓伟. 宁杭高速公路客土喷播绿化防护技术应用[J]. 公路运输文摘,2004(7):31-33.
- [13] 沈毅,晏晓林,梁爱学,等. 厚层基材喷播边坡防护技术研究[J]. 公路交通科技,2007,24(2):151-154.
- [14] 张俊华,常庆瑞,贾科利,等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):38-41.
- [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.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- [17] 康艳,杨晓明,刘仁庆,等. 高速公路边坡物种多样性与土壤特性的关系分析[J]. 中国水土保持,2011(6):50-53.
- [18] 肖蓉,高照良,张兴昌,等. 陕北黄土丘陵沟壑区高速公路边坡不同生物防护模式的土壤特性:以铜(川)—黄(陵)—延(安)高速公路为例[J]. 中国水土保持科学,2009,7(3):79-85.