

张博文,李富平,许永利. 10种草本植物对石矿迹地土壤的改良效果[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):286-290.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.071

# 10种草本植物对石矿迹地土壤的改良效果

张博文,李富平,许永利

(华北理工大学矿业工程学院/河北省矿业开发与安全技术实验室/唐山市矿区生态修复产业技术研究院,河北唐山 063210)

**摘要:**草本植物因其成活率高、种植和养护简单而成为矿区生态修复中必不可少的成分。结合河北省唐山市滦县椅子山采石场废弃地的治理,研究10种草本植物在矿区种植3年后对土壤理化性质、土壤养分、土壤酶的影响。采用隶属函数法就10种草本植物对土壤的修复效果进行综合评价。结果表明,不同草本植物对石矿迹地贫瘠土壤各个指标的影响各不相同,但普遍降低了土壤的pH值和电导率;增加了土壤有机质、碱解氮、速效磷等养分。草本植物的种植改善了矿区贫瘠土壤的根际环境,使土壤中的蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶活性大大增加。由隶属函数平均值排序可知,土壤修复效果由强到弱顺序依次为沙打旺、早熟禾、艾草、狼尾草、无芒雀麦、黑麦草、高羊茅、紫花苜蓿、萱草、剪股颖。

**关键词:**草本植物;植被修复;土壤理化性质;土壤酶

**中图分类号:** S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)21-0286-04

矿山开采会对原有地貌产生极大破坏,严重毁损矿区的植被,形成大量裸露山体,对生态环境造成不利影响<sup>[1]</sup>。植被破坏会影响生态系统稳定性,从而诱发多种环境问题<sup>[2]</sup>。我国有大量矿山废弃地的环境问题亟待解决,由于矿山环境恶劣,表层土壤欠缺且贫瘠,无法提供植被生长的环境<sup>[3]</sup>,仅靠自然修复是数10年内无法恢复到原有植被覆盖度的,因此矿区生态修复治理也逐渐受到重视<sup>[4]</sup>。矿山废弃地常采取植物种植方式来改良土壤理化性质,增加土壤有机质含量,改良土壤酶活性<sup>[5]</sup>。研究表明,石矿迹地土壤复垦的主要限制因子有土壤结构不良、养分贫瘠保水性差<sup>[6]</sup>。秦文展对露天矿边坡进行植被重建,结果表明随着恢复年限增大,土壤各项理化指标均逐渐得到改善<sup>[7]</sup>。土壤酶活性与土壤质量水平息息相关,是矿山废弃地生态修复中的关键因子<sup>[8-9]</sup>。植被恢复首先提供植物生长的土壤等必要条件,植物在土壤中逐渐生长的过程中通过根系分泌物及植物腐殖质来改善土壤性质,从而达到矿区植被生长的良性循环<sup>[10]</sup>。土壤中酶活性在矿区植被恢复和土壤修复中越来越受到重视<sup>[11-12]</sup>。草本植物因其绿化快、管理简单而成为石矿迹地植被恢复的优选物种。本试验选取适宜华北地区气候的、耐性较好的10种草本植物对石矿迹地土壤修复效果进行了研究。

## 1 材料与与方法

### 1.1 矿区毁损现状

试验区位于河北省唐山市滦县榛子镇椅子山采石场,矿区地貌破坏严重,随处可见裸露山体、碎石边坡及采石场废弃平台。土壤稀薄,几乎无植被生存。2014年对该矿区进行

了生态修复,平整了山脚下的废弃碎石,由于治理区缺乏植物生长所需的土壤,因此用本地土对废弃平台进行了覆土。

### 1.2 试验方法

选取适宜北方气候且耐性较好的黑麦草、五芒雀麦、剪股颖、高羊茅、狼尾草、紫花苜蓿、早熟禾、沙打旺、萱草、艾草10种草本植物。将覆土平台分为10块,分别种植10种草本植物。种植前测得初始土样土壤基本参数为土壤pH值7.92、电导率187.9 μS/cm、碱解氮含量7.58 mg/kg、速效磷含量7.95 mg/kg、有机质含量4.85 g/kg。按照土壤分类属于贫瘠土壤。草本植物经过3年的自然生长后长势良好,取得了理想的治理效果。

### 1.3 测定方法

2014年5月种植初期对试验区土壤进行取样分析,2017年6月对10种草本植物种植地块分别进行取土分析。主要对土壤的pH值、电导率、有机质含量、碱解氮含量、速效磷含量、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性、多酚氧化酶活性等指标进行测定。结合各种草本修复3年前、后土壤的各指标变化,明确10种草本植物对土壤理化性质和酶活性的修复效果。土壤养分测定方法参考鲍士旦编著的土壤农化分析教材<sup>[13]</sup>。土壤酶的测定采用关松荫编著的土壤酶及其研究法教材<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用隶属函数法对不同草本植物抗旱指标进行计算分析与评价<sup>[14]</sup>。隶属函数算法如下:

$$u(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \quad (1)$$

式中: $u(X_{ij})$ 为*i*草本*j*指标的隶属函数值; $X_{ij}$ 为*i*物种*j*指标的测定值; $X_{imax}$ 、 $X_{imin}$ 分别为指标的最大值和最小值。指标与抗旱性负相关时,则用反隶属函数,公式为:

$$u(X_{ij}) = 1 - \frac{X_{ij} - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \quad (2)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同草本种植区对土壤理化性质的影响

植物生长状况与土壤的物理化学性质紧密相关。不同草

收稿日期:2017-07-18

基金项目:河北省科技厅项目(编号:16234204D)。

作者简介:张博文(1992—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事矿区生态恢复与重建研究。E-mail:18244572286@163.com。

通信作者:李富平,博士,教授,主要从事矿区生态恢复与重建研究。E-mail:tsxyhk@163.com。

本植物种植区土壤理化指标见表1,不同种类的植物对土壤各理化指标的改善情况有所差异。

表1 不同草本种植区土壤理化性质比较

植物种类	pH 值	电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	有机质含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ )	碱解氮含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )	速效磷含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ )
黑麦草	7.80	120.4	14.36	24.51	18.57
无芒雀麦	7.45	114.5	9.58	20.55	23.53
剪股颖	7.35	83.6	7.98	16.82	27.70
高羊茅	7.01	78.5	12.37	19.25	28.93
狼尾草	7.21	88.8	18.51	23.45	27.08
紫花苜蓿	7.14	76.0	11.17	22.40	23.49
早熟禾	7.09	191.1	15.91	26.25	23.99
沙打旺	7.02	123.1	17.16	31.53	37.38
萱草	7.20	134.5	7.94	16.81	22.09
艾草	6.94	140.5	9.18	25.55	41.43

2.1.1 pH值 大量研究表明,植被恢复能明显改善矿区土壤pH值<sup>[15]</sup>。石灰岩矿区土壤偏碱性,不利于植物生长。种植前所覆土pH值测定值为7.92。3年后对每种草本种植区pH值测定结果见图1。表明不同植被恢复品种对土壤pH值的影响有差异,10种植物种植3年后土壤pH值普遍下降,植物生长3年后对根际土壤的pH值下降幅度大的是艾草、高羊茅、沙打旺,其pH值达到了7.0左右。除黑麦草外,其他草本植物种植3年后都将碱性土壤改良成中性土壤。种植不同草本对土壤pH值变化量排序为艾草>高羊茅>沙打旺>早熟禾>紫花苜蓿>狼尾草>萱草>剪股颖>五芒雀麦>黑麦草。

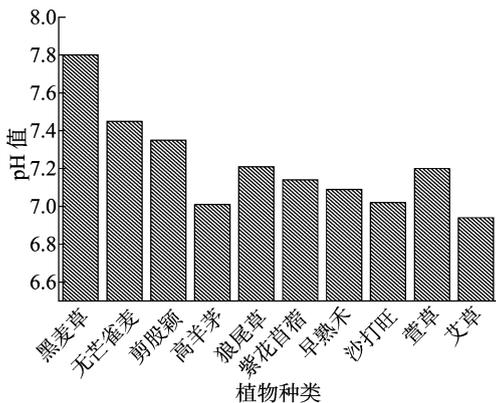


图1 不同草本植物种植区土壤pH值比较

2.1.2 电导率 土壤电导率是土壤盐离子含量的直观表现,能间接反映盐离子对作物生长的限制程度<sup>[14]</sup>。种植植物前矿区覆土土壤电导率值是187.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,10种草本植物种植3年后的电导率结果见图2。植物的生长普遍降低了土壤的电导率,其中紫花苜蓿、高羊茅、剪股颖3种植物的种植使土壤电导率大幅下降,早熟禾的种植并未对土壤的电导率产生明显影响。不同草本植物对电导率的降低效果由强到弱依次为紫花苜蓿>高羊茅>剪股颖>狼尾草>无芒雀麦>黑麦草>沙打旺>萱草>艾草>早熟禾。

2.1.3 有机质 土壤肥沃程度与土壤有机质含量有直接联系<sup>[16]</sup>。种植前所覆土较为贫瘠,按有机质含量划分属于第6级土壤。种植3年后土壤有机质含量测定结果见图3,不同品种种植对土壤有机质含量影响各不相同,但不同草本种植区有机质含量均大幅提高。狼尾草、沙打旺的增幅超过

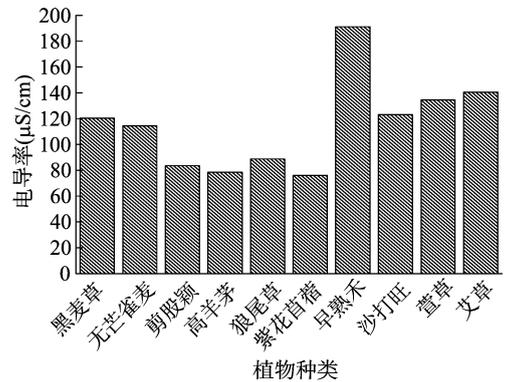


图2 不同草本植物种植区土壤电导率比较

300%,有机质含量增加的主要原因有土壤微生物、植物残体及植物分泌物的增加,狼尾草、沙打旺是生物量最大的2种植物,有机质含量可能与其腐殖残体有关。萱草、艾草、剪股颖、五芒雀麦种植区的有机质增量为150%~200%。10种植物改善土壤效果由强到弱依次为狼尾草>沙打旺>早熟禾>黑麦草>高羊茅>紫花苜蓿>无芒雀麦>艾草>剪股颖>萱草。

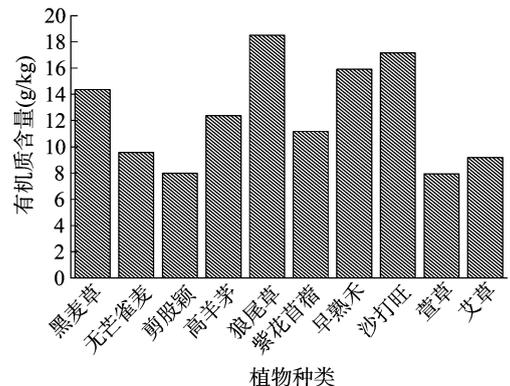


图3 不同草本植物种植区土壤有机质含量比较

2.1.4 碱解氮 种植植物前土壤碱解氮含量为7.58  $\text{mg}/\text{kg}$ ,种植3年后10种草本种植区碱解氮含量见图4。植物生长普遍增加了土壤中碱解氮的含量。紫花苜蓿、沙打旺种植区土壤中碱解氮的含量提高最大。研究表明,紫花苜蓿、沙打旺属于固氮耐贫瘠的豆科植物,根系有固氮活动因而增加了土壤氮含量<sup>[17]</sup>。早熟禾、艾草、黑麦草、狼尾草的种植也使土壤中碱解氮含量大幅提高,其碱解氮含量是种植前的3倍。不同草本植物种植区碱解氮排序依次为紫花苜蓿>沙打旺>早熟禾>黑麦草>艾草>狼尾草>无芒雀麦>高羊茅>剪股颖>萱草。

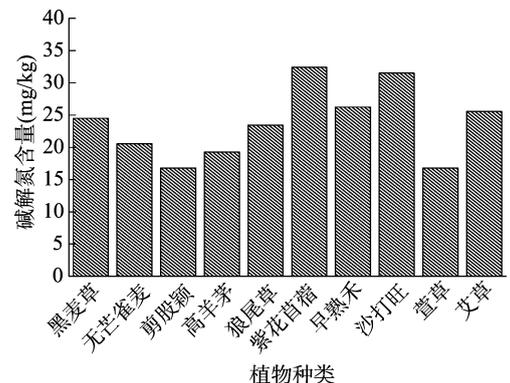


图4 不同草本植物种植区土壤碱解氮含量比较

2.1.5 速效磷 速效磷是可以直接被植物吸收的磷组分,它是植物生长不可或缺的成分<sup>[18]</sup>。原始土壤速效磷的含量为7.95 mg/kg。从图5可以看出,10种植物种植3年后土壤速效磷含量均有明显提高。黑麦草、无芒雀麦、剪股颖、高羊茅、狼尾草、紫花苜蓿、早熟禾、沙打旺、萱草、艾草与初始土样相比速效磷含量分别增加了133.59%、195.94%、248.48%、263.4%、240.64%、195.51%、201.72%、370.15%、177.84%、421.17%。艾草、沙打旺、无芒雀麦种植区的土壤速效磷含量增加最明显。艾草对土壤速效磷含量增幅最大,其次为沙打旺,再次为无芒雀麦。黑麦草对土壤速效磷的增量最小,其他6种植物对土壤速效磷增量处于中等水平,差异不明显。

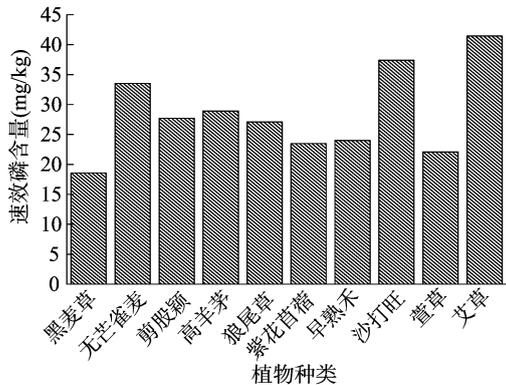


图5 不同草本植物种植区土壤速效磷含量比较

## 2.2 不同草木种植区对土壤酶活性的影响

土壤酶活性已成为评价土壤肥力,土壤质量状况以及土壤熟化程度的指标,对土壤生态系统的物质循环有重要意义<sup>[19-20]</sup>,土壤酶是土壤中物质循环的重要媒介<sup>[11]</sup>。试验测得不同草本植物种植3年后土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶的活性(表2)。

表2 不同草本种植区土壤酶活性比较

植物种类	酶活性(mg/g)			
	过氧化氢酶	蔗糖酶	脲酶	多酚氧化酶
黑麦草	4.42	0.458 0	3.167	0.516 6
无芒雀麦	4.59	0.634 5	1.675	0.819 9
剪股颖	3.87	0.164 7	1.811	0.568 7
高羊茅	4.08	0.228 5	2.762	0.450 2
狼尾草	4.21	0.272 9	1.537	0.658 8
紫花苜蓿	4.22	0.244 1	2.263	0.526 1
早熟禾	4.47	0.512 3	3.033	0.966 8
沙打旺	4.17	0.326 4	2.901	0.995 3
萱草	4.21	0.119 2	1.762	1.241 7
艾草	4.20	0.255 7	2.664	0.492 9

2.2.1 过氧化氢酶 过氧化氢酶可消除过氧化氢对生物的危害作用,且与土壤有机质的形成相关<sup>[21-22]</sup>。从图6可以看出,过氧化氢酶的活性在不同植物间变化不大。其中,无芒雀麦、早熟禾、黑麦草种植区过氧化氢酶活性比其他草本种植区偏高,剪股颖过氧化氢酶活性最低,其他6种植物种植区过氧化氢酶活性差异很小。表明植物种类对土壤中过氧化氢酶含量影响不大。

2.2.2 蔗糖酶 蔗糖酶有利于促进土壤有机质的代谢过程<sup>[22]</sup>。从图7可以看出,不同草本植物间蔗糖酶活性差异很

大,无芒雀麦、早熟禾、黑麦草种植区活性大幅高于其他品种。从蔗糖酶活性指标可以看出,10种草本植物种植对土壤熟化程度由强到弱依次为无芒雀麦>早熟禾>黑麦草>沙打旺>狼尾草>艾草>紫花苜蓿>高羊茅>剪股颖>萱草。

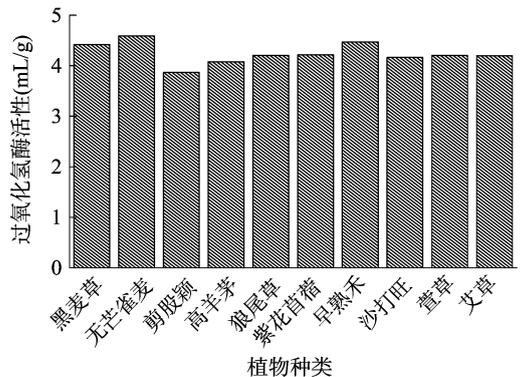


图6 不同草本植物种植区土壤过氧化氢酶活性比较

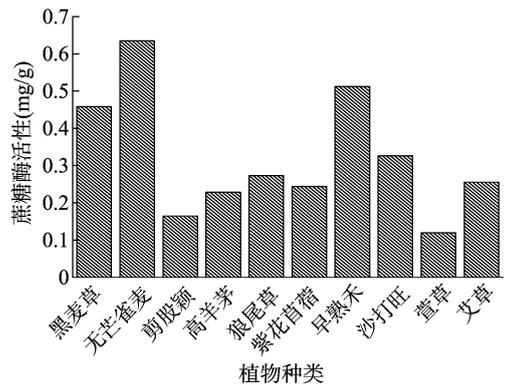


图7 不同草本植物种植区土壤蔗糖酶活性比较

2.2.3 脲酶 安韶山等认为,植被恢复可以提高土壤脲酶活性<sup>[23]</sup>,脲酶能促进土壤氮含量的增加<sup>[24]</sup>。从图8可以看出,10种植物种植区的脲酶活性差异明显。黑麦草、早熟禾、沙打旺、高羊茅、艾草、紫花苜蓿6种植物的种植使土壤中脲酶活性增加明显,其他4种草本植物脲酶增量较低。由于脲酶活性与土壤氮含量相关性较大,综合分析土壤碱解氮与脲酶的相关性可知,10种草本植物对土壤脲酶活性增加程度由强到弱依次为黑麦草>早熟禾>沙打旺>高羊茅>艾草>紫花苜蓿>剪股颖>萱草>无芒雀麦>狼尾草。

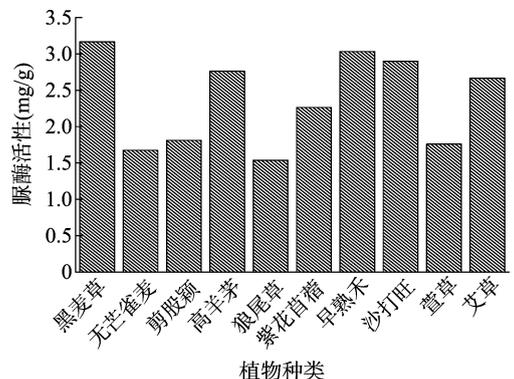


图8 不同草本植物种植区土壤脲酶活性比较

2.2.4 多酚氧化酶 多酚氧化酶是一种复合性酶,它的存在对转化土壤中酚类物质及合成有机质意义重大<sup>[25-26]</sup>。从图9

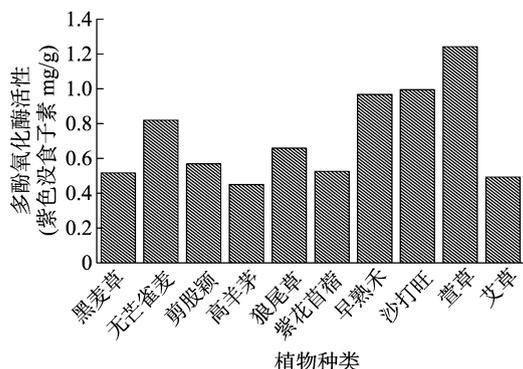


图9 不同草本植物种植区土壤多酚氧化酶活性比较

可以看出,不同草本种植对土壤多酚氧化酶活性差异明显,其中萱草种植使土壤多酚氧化酶活性最高。沙打旺、早熟禾、无

芒雀麦的生命活动对土壤多酚的活性也有明显的增加。综合10种植物对土壤多酚氧化酶活性的增量由大到小依次为萱草>沙打旺>早熟禾>无芒雀麦>狼尾草>剪股颖>黑麦草>紫花苜蓿>艾草>高羊茅。

### 2.3 隶属函数法评价植物改良土壤

10种植物修复对土壤的各个指标改良效果各不相同,使用单一指标来评价植物对土壤的修复效果存在片面性。本研究以10种植物对土壤的pH值、电导率、有机质、碱解氮、速效磷、过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、多酚氧化酶等指标的改良结果为依据。求得10种植物各指标的隶属函数值,并计算各植物所有指标的平均值,按隶属函数平均值排序来评价植物对土壤的修复效果。从表3可以看出,10种草本植物对土壤的改良效果由强到弱顺序依次为沙打旺>早熟禾>艾草>狼尾草>无芒雀麦>黑麦草>高羊茅>紫花苜蓿>萱草>剪股颖。

表3 10种草本植物修复土壤指标隶属函数值综合评价

指标	黑麦草	无芒雀麦	剪股颖	高羊茅	狼尾草	紫花苜蓿	早熟禾	沙打旺	萱草	艾草
pH值	0.000 0	0.407 0	0.523 3	0.918 6	0.686 0	0.767 4	0.825 6	0.907 0	0.697 7	1.000 0
电导率	0.614 2	0.665 5	0.934 0	0.978 3	0.888 8	1.000 0	0.000 0	0.590 8	0.491 7	0.439 6
有机质	0.607 4	0.155 2	0.003 8	0.419 1	1.000 0	0.305 6	0.754 0	0.872 3	0.000 0	0.117 3
碱解氮	0.523 1	0.254 1	0.000 7	0.165 8	0.451 1	0.379 8	0.641 3	1.000 0	0.000 0	0.593 8
速效磷	0.000 0	0.217 0	0.399 4	0.453 2	0.372 3	0.215 2	0.237 1	0.822 8	0.154 0	1.000 0
过氧化氢酶	0.763 9	1.000 0	0.000 0	0.291 7	0.472 2	0.486 1	0.833 3	0.416 7	0.472 2	0.458 3
蔗糖酶	0.657 5	1.000 0	0.088 3	0.212 1	0.298 3	0.242 4	0.762 9	0.402 1	0.000 0	0.264 9
脲酶	1.000 0	0.084 7	0.168 1	0.751 5	0.000 0	0.445 4	0.917 8	0.836 8	0.138 0	0.691 4
多酚氧化酶	0.083 9	0.467 1	0.149 7	0.000 0	0.263 6	0.095 9	0.652 7	0.688 7	1.000 0	0.053 9
均值	0.472 2	0.472 3	0.251 9	0.465 6	0.492 5	0.437 5	0.625 0	0.726 3	0.328 2	0.513 3
排序	6	5	10	7	4	8	2	1	9	3

### 3 结论与讨论

黑麦草、无芒雀麦、剪股颖、高羊茅、狼尾草、紫花苜蓿、早熟禾、沙打旺、萱草、艾草10种植物的种植增加了土壤养分,增大了土壤酶活性。植物的种植普遍降低了土壤pH值和电导率,改善了土壤的酸碱度和盐分。从对土壤pH值的影响上看,艾草、高羊茅、沙打旺、早熟禾、紫花苜蓿、狼尾草等植物的效果明显;从对土壤电导率的影响上看,狼尾草、沙打旺、早熟禾、黑麦草、高羊茅、紫花苜蓿等植物的效果明显。

10种草本植物种植3年后改良了土壤性状,明显增加了土壤中有有机质、碱解氮、速效磷等土壤养分。从对土壤有机质的影响上看,狼尾草、沙打旺、早熟禾、黑麦草、高羊茅、紫花苜蓿等植物对土壤有机质含量的增加明显;从对土壤碱解氮含量的影响上看,紫花苜蓿、沙打旺、早熟禾、黑麦草、艾草、狼尾草等植物对土壤碱解氮含量增加明显;从对土壤速效磷的影响上看,艾草、沙打旺、无芒雀麦对土壤速效磷含量的增加更为明显。

草本植物明显改善了矿区生土的根际环境,使土壤中的蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶活性大大增加。无芒雀麦和早熟禾对土壤过氧化氢酶和蔗糖酶的活性提升明显;沙打旺、萱草、早熟禾、无芒雀麦对土壤多酚氧化酶活性提升明显;沙打旺、早熟禾、艾草、高羊茅、紫花苜蓿均对土壤脲酶活性提升明显。

利用10种植物改变土壤的pH值、电导率、有机质含量、碱

解氮含量、速效磷含量、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性、多酚氧化酶活性等指标的隶属函数值的平均值排序来评价植物对土壤的修复效果。得出10种草本植物对土壤的综合改良效果由强到弱顺序依次为沙打旺>早熟禾>艾草>狼尾草>无芒雀麦>黑麦草>高羊茅>紫花苜蓿>萱草>剪股颖。

### 参考文献:

- [1] 刘海龙. 采矿废弃地的生态恢复与可持续景观设计[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 323-329.
- [2] 温仲明, 焦峰. 自然植被分布预测研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 117-142.
- [3] 周树理. 矿山废弃地复垦与绿化[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 1-13.
- [4] 蓝崇钰, 束文圣, 孙庆业. 采矿地的复垦[M]//陈昌笃. 持续发展与生态学. 北京: 中国科学技术出版社, 1993: 132-138.
- [5] 庄凯. 福建不同类型矿山废弃地植被的恢复与重建研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [6] 刘世忠, 夏汉平, 孔国辉, 等. 茂名北排油页岩废渣场的土壤与植被特性研究[J]. 生态科学, 2002, 21(1): 25-28.
- [7] 秦文展. 露天铝土矿生态恢复过程中生物多样性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [8] Izquierdo I, Caravaca F, Alguacil M M, et al. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(1): 3-10.

丁金华,薛姜婷. 基于环境正义的乡村生态规划策略[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):290-296.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.072

# 基于环境正义的乡村生态规划策略

丁金华,薛姜婷

(苏州科技大学建筑与城市规划学院,江苏苏州 215011)

**摘要:**环境正义的实质是环境责任的合理承担和生态利益的公正分配。随着城乡一体化进程的推进,以此为切入点的乡村生态规划成为时代需要。在研究相关概念的基础上,结合苏南乡村实例调研,从环境正义视角探析乡村规划中存在的公众参与薄弱、资源分配模糊、保障机制不足等一系列普遍性问题,着重从规划的决策、运行、管理3个层面分别提出拓宽村民权利实现渠道、调节空间资源分配路径、完善生态权益保障机制等有针对性的乡村生态规划策略,为乡村建设提供新的思路。

**关键词:**环境正义;乡村;生态规划;利益协调

**中图分类号:** TU982.29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)21-0290-07

近年来,中央一号文件持续把“三农”问题放在重要位置,“十三五”规划中《深化农村改革综合性实施方案》更明确授予乡村弱势群体更多权益,足见国家对乡村问题的关注和重视<sup>[1]</sup>。然而随着城乡一体化进程的推进,大多乡村规划依赖生态环境资源先天的非排他性和非竞争性而对其过度消耗,盲目追求经济发展,使得经济建设范围不停扩张。该传统

规划方法一方面弱化了生态建设对村庄发展的重要性,造成环境资源浪费、生态空间萎缩、土地功能退化等一系列生态问题,原有生态系统平衡格局被打破;另一方面忽略了乡村规划中相关利益主体的环境利益诉求,特别是弱势群体的环境利益诉求,出现空间资源分配失衡,各方利益矛盾冲突激化等现象,各利益主体间关系僵化。这两方面的问题在乡村规划中不断凸显,亟须得到重视和解决,而环境正义概念恰好与此乡村规划问题相契合。但目前关于环境正义的大量研究主要集中在哲学、管理学、法学、生态学、社会伦理学等学科领域,与风景园林学结合并用于解决乡村规划问题的相关研究较少。因此,本研究以苏南地区典型村庄为例,进行问卷调查和深入访谈,尝试剖析环境正义视角下乡村规划中的诸多问题,

收稿日期:2017-06-22

基金项目:国家自然科学基金(编号:41301191);江苏省建设系统科技项目(编号:2016ZD06);苏州科技大学风景园林学学科建设项目。

作者简介:丁金华(1973—),女,江苏苏州人,副教授,主要从事城乡生态环境规划与设计研究。E-mail: yzdingjh@163.com。

[9] Bentham H, Harris J A, Birch P, et al. Habitat classification and soil restoration assessment using analysis of soil microbiological and physico-chemical characteristics[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(3): 711-718.

[10] 魏平. 矿区土地复垦及保障措施探讨[J]. *中国煤炭*, 2010, 36(7): 132-133.

[11] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 1-327.

[12] 周礼楷. 土壤生态研究的展望[J]. *应用生态学报*, 1991, 2(2): 178-180.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-110.

[14] 张伟华, 关世英, 李跃进, 等. 不同恢复措施对退化草地土壤水分和养分的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2000, 21(4): 31-35.

[15] 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1932-1940.

[16] Rogers G S, Milham P J, Thibaud M C. interactions between rising CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen supply in cotton growth and leaf nitrogen concentration[J]. *Austr J Plant Physiol*, 1996, 23: 119-125.

[17] 李永庚, 蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展[J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 95-101.

[18] 王志宏, 李爱国. 矿山废弃地生态恢复基质改良研究[J]. *中国矿业*, 2005, 14(3): 22-23.

[19] Zak D R, Pregitzer K S, Curtis P S, et al. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and feedback between carbon and nitrogen cycles[J]. *Plant & Soil*, 1993, 151(1): 105-117.

[20] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 263-269.

[21] 鲁萍, 郭继勋, 朱丽, 等. 东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 675-679.

[22] 包维楷, 陈庆恒. 生态系统退化的过程及其特点[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 37-43.

[23] 安韶山, 黄懿梅, 郑粉莉. 黄土丘陵区草地土壤脲酶活性特征及其与土壤性质的关系[J]. *草地学报*, 2005, 13(3): 233-237.

[24] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1): 105-109.

[25] Diamantidis G, Eosse A, Potier P, et al. Purification and characterization of the first bacterial laecase in the rhizospheric bacterium *Azospirillum lipoferum*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 919-927.

[26] Toscano G, Colarieti M L, Greco G. Oxidative polymerisation of phenols by a phenol oxidase from green olives[J]. *Enzyme & Microbial Technology*, 2003, 33(1): 47-54.