

黄土区人工林与自然封育对土壤养分的影响

谢静^{1,2}, 郑学良^{1,2}, 朱清科^{1,2}, 王晶^{1,2}, 邝高明^{1,2}

(1. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为客观评价不同植被恢复方式对土壤养分的影响, 采用野外调查结合室内试验分析的研究方法, 分别对黄土丘陵区人工林和自然封育的两个流域的土壤养分及组分有机碳进行了对比研究。结果表明, 植被恢复 11 a 来, 人工林流域土壤同自然封育流域土壤相比较, 出现了酸化倾向。在 0—60 cm 土层深度内, 土壤全氮、全磷以及全钾含量均表现为人工林流域高于自然封育流域, 且人工林流域全氮、全磷及全钾的变异系数大于自然封育流域的养分含量。自然封育流域在 0—60 cm 土层积累了更多的土壤重组有机碳和轻组有机碳, 土壤表层轻组有机碳含量在两种恢复方式间的差异较大, 而中下层差异较小。土壤有机碳组分含量变异系数为人工造林流域高于自然封育流域。研究结果说明人工林和自然封育对土壤氮磷钾的改善和有机质积累方面的改善各有利弊。

关键词: 人工造林; 自然封育; 土壤养分; 土壤组分有机碳

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0035-05

中图分类号: S157.5

Soil Nutrient Responses to Artificial Restoration and Natural Recovery in Loess Hilly Region

XIE Jing^{1,2}, ZHENG Xue-liang^{1,2}, ZHU Qing-ke^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, KUANG Gao-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory for Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Soil and Water Conservation Academy, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To evaluate the impacts of different revegetation methods on soil nutrients, this study combined laboratory analyses with field surveys in two watersheds: one subjected to artificial restoration (AR) and the other to natural recovery (NR). The results show that, after 11 years of restoration, the soils in the AR watershed were more acidified than those in the NR watershed. In the soil of 0—60 cm, total N, total P, and total K contents in the AR watershed soils were higher than those in NR watershed soils, with greater coefficients of variation. In contrast, the NR watershed accumulated more soil organic carbon of both heavy and light fractions, in the same soil layers. The contents of light fraction soil organic carbon differed most between the surface soils of the two recovery methods, while much less in the lower soil layers. The coefficients of variation of the organic carbons fraction in the soils of the AR watershed were higher than those of the NR watershed soils. The results indicate that the processes of artificial restoration and natural recovery accumulate soil N, P, K and organic carbon in different ways.

Keywords: artificial restoration; natural recovery; soil nutrient; soil fraction organic carbon

生态恢复不仅与当前生态学研究领域的热点——全球变化紧密相连, 更关乎区域环境安全及可持续发展。生态恢复引起一系列环境、经济、社会效应, 使得生态恢复的效果评估成为生态学研究领域里重要的一环^[1]。当前植被恢复主要采取两种方式, 人工造林和自然封育, 这两种方式存在着恢复思路和具体适应条件上的很大不同, 在某特定地区应选取哪种恢复方式应取决于该区的特殊自然条件和具体恢复目标和需

求^[2]。然而关于这两种方式的恢复效果的研究也相当重要, 其结果能客观揭示其恢复进程, 从而帮助决策者根据该地区具体要求以选择服务于该区恢复目标的恢复方式, 而目前关于人工造林和自然封育这两种恢复方式的对比研究结论仍存在着很多分歧。

半干旱的陕北黄土丘陵沟壑区位于黄土高原中北部, 处在华北土石山区向毛乌素沙地过渡的农牧交错带, 是典型的生态脆弱区域, 在我国北方生态环境

收稿日期: 2011-10-13

修回日期: 2011-11-04

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“黄土及华北石质山区水土保持林体系构建技术研究”(2011BAD38B06)

作者简介: 谢静(1987—), 女(汉族), 贵州省金沙县人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境地理学及土壤碳循环。E-mail: xiejingbjfu@gmail.com。

通信作者: 朱清科(1956—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土保持和林业生态工程。E-mail: zhuqingke@sohu.com。

建设中具有重要地位。由于长期严重水力侵蚀,使得该区大部分地区地形破碎化严重,造成了多样化的微生境,因此因地制宜、适地适树等恢复思路显得尤为重要^[3-4],进而使得恢复方式的选择也存在着很大的弹性。自 1999 年实施的退耕还林还草工程对该区的土地覆被/利用产生了很大的影响,如今十余年过去,该工程产生的生态效应的相关评估也逐渐成为了生态学领域研究者的关注热点^[5]。但目前关于该区这两种主要恢复方式的对比研究主要关注于生物多样性、生物量、土壤水分等方面^[6-8],而针对于土壤有机碳及其它土壤养分的研究则相对较少。而土壤养分对植被生长、土地利用等都有重大影响^[9-10],因此研究该区人工造林和自然封育两种恢复方式下土壤养分的变化特征,对于揭示其恢复进程和机理及恢复效果具有重要意义,同时也为客观评价两种恢复方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市西北部的吴起县(107°38′57″—108°32′49″E, 36°33′33″—37°24′27″N)。吴起县地处黄河中游、北洛河和无定河上游,处于黄土高原腹地,属于森林草原过渡地带,是典型的生态脆弱区。吴起县南北长 93.4 km,东西宽 79.89 km,总面积 3 791.5 km²,地貌属于黄土高原梁状丘陵沟壑区,气候属于中温带半湿润、半干旱区,具有明显的温带大陆性季风气候特征。年平均气温 7.8℃,多年平均降雨量 483.4 mm,雨季集中在 7—9 月份,此期降水量多达全年降水量的 50%~80%,无霜期为 83~136 d。研究区总的气候特征是春温高于秋温,春季升温缓慢,秋季降温迅速。

由于地处我国东部季风湿润区与内陆干旱区的过渡地带,吴起县植被性质带有明显的过渡特色,植被类型表现为中温带森林灌丛草原植被向草原化森林灌丛草原植被过渡特征,植物组成以华北区系植物占主导地位。地带性植被为森林灌丛草原,由于长期的人为经济活动,原有植被已不复存在,现有植被中均以次生植被为主,其中落叶阔叶林及灌木草丛占主导地位。近几年,随着退耕还林还草工程的实施,吴起县境内林草覆盖面积明显增长,该县林业用地达 8.83×10^4 hm²。主要地带性植物种类有小叶杨(*Populus simonii*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Prunus armniacal*)等,灌木主要是柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippo-*

phae rhamnoides)。草本以菊科(*Compositae*)、禾本科(*Gramineae*)、豆科(*Leguminosae*)为主,主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedezadavurica*)等。

1.2 试验设计及样品采集

在吴起县选取两个分别采取了两种恢复方式的流域——合沟流域和柴沟流域。其中,合沟流域 3.5 km²,于 1999 年开始进行封育,之后始终采取自然封育的方式进行恢复。柴沟流域总面积为 3.0 km²,从 1999 年开始到 2003 年每年进行人工植树,之后进行封育恢复。合沟流域和柴沟流域同属于一个分水岭,十分邻近,气候、水文条件类似,退耕前两个流域均大部分为坡耕地,且二者面积相当,在野外条件下这样的地理位置使得这两个流域的恢复过程具有相当的可比性,这是本研究得以展开的基础。恢复 11 a 之后,柴沟流域目前植被以乔灌草混交为主,而单纯采取了自然封育的合沟流域植被覆被则主要以草本为主,只在个别微地形条件下有少量的灌木开始出现。

在野外实地调查的基础上在合沟流域选取了 8 个典型立地类型,在柴沟流域选取了 9 个典型立地类型。这 17 个立地类型囊括了这两个流域内几乎所有的立地类型。对于每种样地类型,选取 3 个采样样方,其中每个样方面积约为 20 m×20 m,在每个样方内用直径为 7 cm 的土钻分别在 0—10 cm, 10—30 cm, 30—60 cm 土层深度进行 5 次重复采样。选取这样的采样深度,是因为土壤表层以下 0—60 cm 是植被根系活动最积极的一个深度范围,也是土壤营养分布的重要土层^[11]。最后共计从 17 种立地类型中的 51 个样方内采得 765 个土样,土壤采集完毕后,按照深度把来自同一样方地的土样均匀混合,最后得到 51 个土壤样品,挑拣其中的树木根系等杂物后进行风干,过 2 mm 筛待测。

1.3 分析测定

土壤有机质组分采用 Gregorich 和 Ellert^[12]描述的方法,由 SGS(上海)公司进行测定。土壤重组组分和轻组组分由比重为 1.82 g/ml 的 NaI 溶液进行振荡分离,测定分离出的重组组分中的有机碳含量,计算得出重组中有机碳百分含量,重组组分中的有机碳含量占所测土壤样本的百分含量即为土壤中重组有机碳百分含量。相应地,用同样的方法进行测定,计算得到轻组中有机碳百分含量和土壤中轻组有机碳百分含量。土壤全氮采用浓硫酸混合加速剂法测定,土壤全磷的测定采样酸溶法 HClO₄—H₂SO₄ 法,土壤

全钾采用 NaOH 熔融法测定。

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 17.0 对测定和调查所得数据进行统计分析。采用 Excel 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤养分的剖面分布特征

研究结果表明(图1),人工造林和自然封育两种恢复方式对土壤养分积累所起的作用是不同的,且两种恢复方式下各土壤养分含量随土层的加深也表现出很不同的变化趋势。整体上,土壤全钾表现为人工造林更有利于全钾的积累,而土壤全氮和土壤全磷都是在10—30 cm深度范围内为人工造林流域低于自然封育流域,而其它深度也均是人工造林流域的土壤中含量更高。总体来说,这3种土壤养分人工造林流域的含量总体比自然封育流域大,说明研究区人工植被恢复要比自然封育更有利于3种土壤养分的积累。土壤pH值大致表现为人工造林流域较低一些,说明相比起自然封育流域的土壤人工造林土壤有酸化的倾向。

值得注意的是,自然封育流域内全氮、全钾、全磷含量随土层深度的变化均表现为先升高后降低的趋势,这可能与自然封育流域内主要为草本群落有关。草本群落整体来说其根系活动深度较浅^[13],对表层土壤中的养分利用程度最高,而对土壤中层所含养分的利用要稍小一些,所以表层土壤养分低于中层。而

土壤下层由于黄土特质其本来持有的养分就少,与地上植被的养分交换也较少,所以其全氮、全磷和全钾含量也相对较少。而人工造林流域土壤养分则是随土壤深度加深而先降低后增加,原因也是地上植被的影响,人工造林流域地上植被为乔灌草混交群落,其对土壤养分的利用深度较草本群落要深^[13],且地上部分凋落物补给又较草本群落要多,故呈现出全氮、全磷、全钾这3种土壤养分都随土层加深而先降低后增加的变化特征。植被类型对土壤养分的积累有着重大的影响,不同植物群落其根系活动深度、产生的根系分泌物、死亡根系量等都不同,使得其对土壤养分的吸收强度和深度、补给能力产生很大的差异^[14-16]。人工造林流域已发展出较为复杂的乔灌草混交结构^[6],大量的植物凋落物、死亡根系等的产生将使得土壤养分得到了补充,因此土壤全钾、全氮及全磷要高于以草本为主要植被的自然封育流域。而大量生长的乔灌木由于其根系活动深度更深,使得人工造林流域内10—30 cm深度范围内的土壤养分也产生了消耗,还未及时补充,所以呈现出人工造林流域内10—30 cm深度内土壤全氮和全磷低于自然封育的特征。而此土层深度范围内土壤全钾含量却表现为人工造林流域略高于自然封育流域,这是由于该区土壤钾含量相对丰富,且可供利用的主要为速效钾^[8],所以土壤中层的全钾表现出与全氮和全磷不同的变化规律。

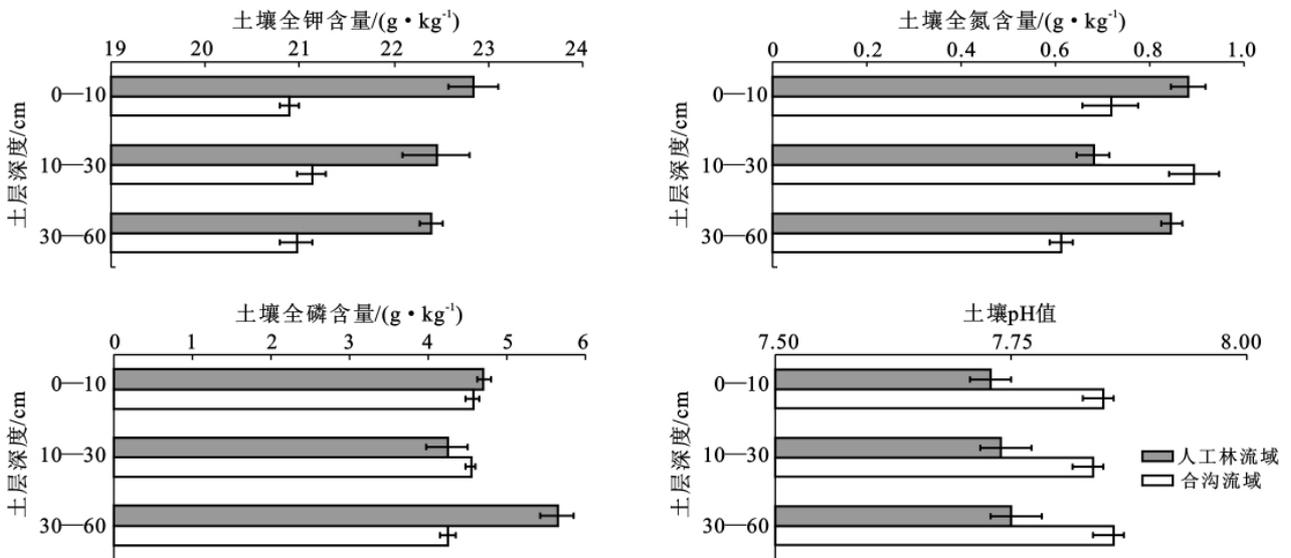


图1 研究区土壤全钾、全氮、全磷及酸碱度分布

2.2 土壤养分割面分布的变异性规律

两种恢复方式下土壤不同深度土壤养分变异情况见表1。由表1可以看出,各土壤养分指标的平均变异系数大小顺序大致表现为:全氮 > 全磷 > 全钾 >

pH值。全氮、全磷、全钾的变异性差异除了来自植被类型的影响之外,还可能与土壤中氮、磷、钾的周转周期、利用方式不同有关,具体转化利用机制还需要进一步研究。不同指标在各土壤深度内又各为不同,大

致趋势表现为 10—30 cm 深度内变异系数最大,原因可能是植物根系主要在这个深度范围内活动,植物生长消耗大量土壤养分,而补给量又不及表层土壤,所以导致该土层深度内土壤养分所受扰动较大,从而变异系数比其它土层大。

表 1 研究区土壤养分变异系数特征值

测定指标	土层深度/ cm	人工造林 流域	自然封育 流域
全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	0—10	0.11	0.10
	10—30	0.38	0.09
	30—60	0.19	0.14
全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	0—10	0.25	0.46
	10—30	0.30	0.35
	30—60	0.13	0.22
全钾/ ($g \cdot kg^{-1}$)	0—10	0.07	0.03
	10—30	0.10	0.04
	30—60	0.03	0.05
pH 值	0—10	0.02	0.01
	10—30	0.02	0.01
	30—60	0.02	0.01

2.3 土壤组分有机碳的分布规律

土壤有机碳又可分为重组中的有机碳和轻组中的有机碳,一般来说,重组有机碳代表着土壤中周转较慢、较不活跃的那一部分有机碳,而轻组组分结合的矿质颗粒较少,受矿质颗粒保护的程低,易被利

用,代表着土壤中周转较快、活性较高的那一部分有机碳^[17]。由于不同组分有机碳周转周期的不同,考察土壤中重组和轻组有机碳的变化规律能较总体考察土壤全碳能更客观地表示两种不同的恢复方式对不同活性的土壤有机碳的影响,从而为客观评估这两种恢复方式对土壤碳库影响提供更具体的依据。

两种恢复方式下土壤重组和轻组中有机碳的含量以及土壤中所含的重组有机碳和轻组有机碳含量的剖面分布如图 2 所示。由图 2 可见,轻组中有机碳含量要比重组中有机碳含量高约 10 倍,这主要是由于重组和轻组的组成成分不同而造成的。重组主要是腐殖化比较成熟的组分,而轻组主要是由半分解组分所组成的,其有机碳含量自然要高出重组组分很多。且无论是重组和轻组中有机碳含量,还是土壤中重组有机碳和轻组有机碳含量,均表现为自然封育流域的高于人工造林流域的,说明自然封育比人工造林的恢复方式要更有利于土壤中有机碳组分的积累,尤其是轻组分有机碳的积累,这对于碳素在土壤碳库和生物碳库、大气碳库之间的周转、转化具有重要意义。此外,重组和轻组中有机碳含量以及土壤中重组有机碳含量在 3 个土层之间的差异在两种恢复方式下较为一致,但土壤轻组有机碳含量则表现为在表层两种恢复方式下差异很大,而在中下层差异减小。这种变化趋势也说明了处在土壤表层和轻组组分这两个因素使得其所含养分更容易受到外界扰动的规律。

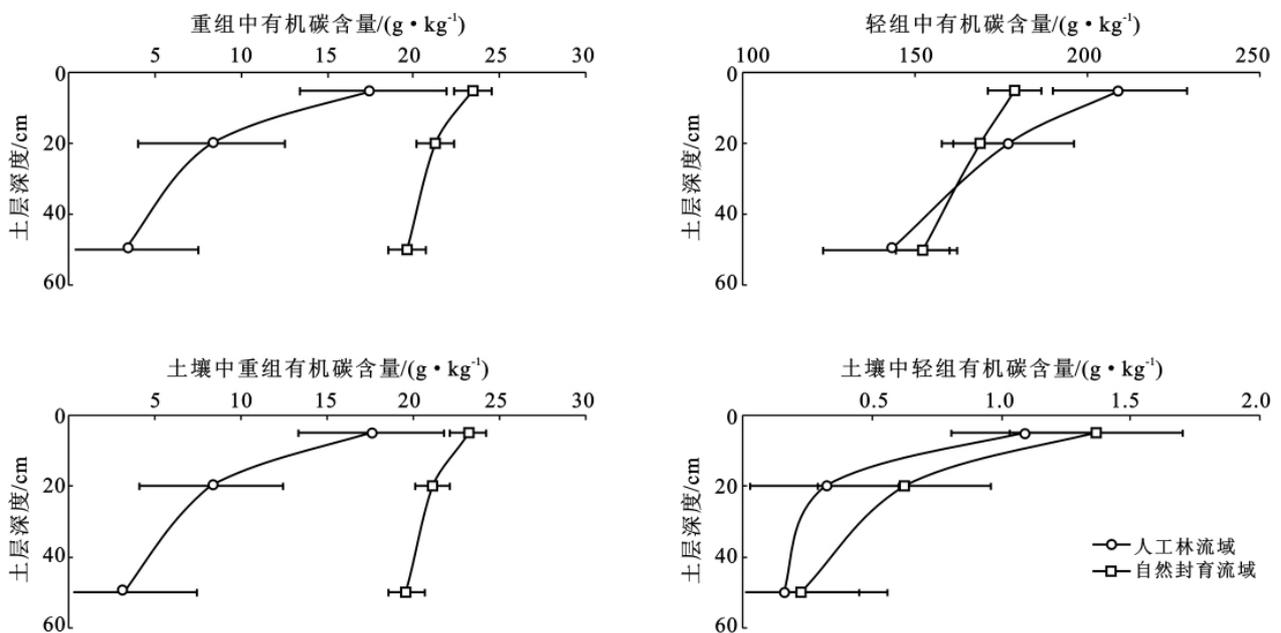


图 2 研究区土壤组分有机碳分布特征

自然封育流域内植被群落主要为草本群落,而人工造林流域内主要为乔灌草混交群落,导致两流域内

植被凋落物量和植被类型大为不同,而研究区处于半干旱地区,气候干冷,不利于凋落物分解,凋落物分解转化较慢^[18]。同时,植被生长尤其是乔灌木生长消耗了土壤中大量养分,而又未来得及对土壤进行充足的补给,使得研究区这两种恢复方式在本研究时间尺度内土壤有机碳和其它土壤养分呈现了本研究中所体现的情况。而本研究中两种恢复方式对土壤全氮、全钾、全磷与土壤有机碳积累的影响各不相同,郑江坤^[3]等人也指出,人工修复和自然恢复在群落稳定性和积累有机物质等方面各有利弊。

2.4 土壤组分有机碳分布的变异性规律

土壤组分有机碳含量分布的变异性详见表 2。从表 2 可以看出,在所研究的 3 个土层深度范围内均表现为人工造林流域的变异系数大于自然封育流域的。人工造林流域的地表植被差异性远大于自然封育流域的,人工造林流域地表植被群落为乔灌草混交群落,而自然封育流域几乎全部为草本群落,差异性较前者小。而在人工造林群落中,重组中有机碳含量变异性为中层最大,而轻组中有机碳含量为表层远大于其它两层,由轻组组分的组成特征也说明了在人工造林流域的地表凋落物分布的差异性对表层土壤有机碳起到了很大的影响。但土壤中轻组有机碳含量的变异性为中层远大于其它两层,这从另一方面体现了在人工造林流域内地表植被分布的差异性很大,从而不同的植被根系对土壤中层土壤有机碳产生了不同的影响。

表 2 土壤组分有机碳变异系数特征值

测定指标	土层深度/ cm	人工造林 流域	自然封育 流域
重组有机碳含量/ (g · kg ⁻¹)	0—10	2.58	0.01
	10—30	4.31	0.03
	30—60	1.72	0.03
轻组有机碳含量/ (g · kg ⁻¹)	0—10	5.12	0.00
	10—30	2.91	0.00
	30—60	2.52	0.00
土壤中重组有机碳/ (g · kg ⁻¹)	0—10	2.54	0.01
	10—30	4.30	0.03
	30—60	1.70	0.03
土壤中轻组有机碳/ (g · kg ⁻¹)	0—10	3.86	0.24
	10—30	11.38	0.15
	30—60	1.91	0.06

3 结论

(1) 退耕 11 a 后,人工造林加封育流域比单纯依靠自然力进行封育的流域土壤养分含量相对更高一

些,人工造林土壤出现酸化倾向。土壤全氮、全磷及全钾含量在人工造林流域中呈现随土壤深度加深而先降低后增加的变化趋势,而在自然封育流域中则表现出随土壤深度加深而先增加后降低的变化趋势。此外,总体来说,两种恢复方式下的变异系数均大致表现为:全氮 > 全磷 > 全钾 > pH 值,且在各土层深度范围内均为表现为人工造林流域的变异性大于自然封育流域。

(2) 土壤组分有机碳表现为两种恢复方式下均是轻组中有机碳含量比重组中有机碳含量高约 1 倍,而土壤中重组有机碳含量是轻组有机碳含量的近 20 倍,说明重组组分是土壤中重要的有机碳库。轻组中有机碳浓度虽然很高,但占总有机碳的比例很小,只占总有机碳的 3% ~ 6%。人工造林流域内重组和轻组有机碳含量均低于自然封育流域,且二者间土壤轻组有机碳含量为表层差异最大,而中下两层差异较小。3 个土层深度内人工造林流域土壤组分有机碳的变异系数均大于自然封育流域的。

(3) 从目前恢复 11 a 的土壤全氮、全磷以及全钾的积累方面来看,该区人工造林的恢复方式要优于自然封育的恢复方式;而从土壤有机碳的积累方面来看,则是自然封育的恢复方式更优。由于本研究时间、空间尺度都较小,结果的外推和应用还需要进一步的检验和研究。

[参 考 文 献]

- [1] 王盛萍,张志强,张化永,等. 黄土高原防护林建设的恢复生态学与生态水文学基础[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2475-2483.
- [2] 吴丹丹,蔡运龙. 中国生态恢复效果评价研究综述[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 622-628.
- [3] 许智超,张岩,刘宪春,等. 半干旱黄土区退耕还林十年植被恢复变化分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 91-96.
- [4] 张笑培,杨改河,王和洲,等. 黄土沟壑区不同植被恢复群落特征及多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 22-25.
- [5] 张文辉,刘国彬. 黄土高原植被生态恢复评价、问题与对策[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 102-106.
- [6] 刘中奇,朱清科,秦伟,等. 半干旱黄土区自然恢复与人工造林恢复植被群落对比研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 857-863.
- [7] 郑江坤,魏天兴,朱金兆,等. 黄土丘陵区自然恢复与人工修复流域生态效益对比分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(6): 990-1000.

(下转第 46 页)

- [2] 曹萍, 邵国军, 吕文彦, 等. 节水栽培对稻米品质影响初步研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(3): 177-179.
- [3] 蔡亮. 持续中度水分胁迫对水稻耗水量和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2010(10): 29-31.
- [4] 程建平, 曹凑贵, 潘圣刚, 等. 不同灌溉方式下水稻产量性状相关性及其通径分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 96-99.
- [5] 董淑喜, 徐淑琴. 水分胁迫对寒区水稻生长特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 64-66.
- [6] 邵玺文, 刘红丹, 杜震宇, 等. 不同时期水分处理对水稻生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 193-196.
- [7] 张瑞珍, 邵玺文, 董淑媛, 等. 开花期水分胁迫对水稻产量构成及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(1): 1-3, 7.
- [8] 张卫星, 朱德峰, 林贤青, 等. 干旱胁迫对不同穗型超级稻品种产量及穗部性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 255-260.
- [9] 蔡一霞, 朱庆森, 王志琴, 等. 结实期土壤水分对稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 601-608.
- [10] 刘凯, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期土壤水分和灌溉方式对水稻产量与品质的影响及其生理原因[J]. 作物学报, 2008, 34(2): 265-276.
- [11] 杨建昌, 袁莉民, 唐成, 等. 结实期干湿交替灌溉对稻米品质及籽粒中一些酶活性的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(8): 1052-1057.
- [12] 赵步洪, 叶玉秀, 陈新红, 等. 结实期水分胁迫对两系杂交稻产量及品质的影响[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 25(1): 46-50.
- [13] 郑家国, 任光俊, 陆贤军. 花后水分亏缺对水稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(3): 239-243.
- [14] 王成瑗, 王伯伦, 张文香, 等. 不同生育时期干旱胁迫对水稻产量与碾米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 643-649.
- [15] 郑桂萍, 李金峰, 钱永德, 等. 土壤水分对水稻产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(8): 1261-1264.
- [16] 徐一戎. 水稻优质米生产技术与研究[M]. 哈尔滨: 黑龙江朝鲜民族出版社, 1998.
- [17] 朱庆森, 邱泽森, 姜长鉴, 等. 水稻各生育期不同土壤水势对产量的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 27(6): 15-22.
- [18] 解文孝, 张文忠, 史鸿儒, 等. 不同时期土壤水分胁迫对水稻产量及食味品质影响的研究[J]. 辽宁农业科学, 2007(2): 30-33.
- [19] 郑桂萍, 郭晓红, 陈书强, 等. 水分胁迫对水稻产量和食味品质抗旱系数的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(2): 142-146.
- [20] 柯传勇. 不同水分处理对水稻生长、产量及品质的影响[J]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [21] 陈新红. 土壤水分与氮素对水稻产量和品质的影响及其生理机制[J]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2004.
- [22] 吕艳东, 李红宇, 郭晓红, 等. 土壤水分对稻米外观品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 238-242.

(上接第 39 页)

- [8] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域沟坡水热条件及其生态修复初探[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 183-189.
- [9] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 946-954.
- [10] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 604-612.
- [11] 秦树高, 吴斌, 张宇清. 林草复合系统地下部分种间互作关系与化感作用研究进展[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 253-261.
- [12] Georich E G, Ellert B H. Light fraction and macroorganic matter in mineral soils [M]//Carter M R, ed. Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Boca Raton: Lewis Publishers, Division of CRC Press, 1993: 397-405.
- [13] 隋媛媛, 杜峰, 张兴昌. 黄土丘陵区撂荒群落土壤速效养分空间变异性研究[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 76-84.
- [14] 薛蕙, 刘国彬, 戴全厚, 等. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*) 土壤微生物量演变特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 909-917.
- [15] 杨绒, 严德翼, 周建斌, 等. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1397-1403.
- [16] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒草地群落生物量及植被土壤养分效应[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1673-1683.
- [17] Paul S, Veldkamp E, Flessa H. Soil organic carbon in density fractions of tropical soils under forest-pasture-secondary forest land use changes [J]. Eur. J. Soil Sci., 2008, 59(2): 359-371.
- [18] 刘中奇, 朱清科, 邴高明, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区封禁流域植被枯落物分布规律研究[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 20-24.