

沙地衬膜水稻田休耕对土壤氮磷钾库容的影响

孙琳, 欧阳, 于飞, 梁雷*

辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年3月5日; 录用日期: 2022年4月5日; 发布日期: 2022年4月12日

摘要

探究科尔沁沙地连续种植衬膜水稻与种稻后休耕对土壤氮磷钾库的影响, 为荒漠化治理提供科学依据。以研究区未修复沙地为对照, 测定连续种稻和种稻后休耕0~15和15~30 cm土层土壤全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷和有效钾含量, 同时分析休耕土壤氮磷钾库容与环境因子的相关性。结果表明: 种稻和休耕对土壤氮磷钾库组分含量影响显著, 土壤全氮含量以及C/N总体呈先显著升高后显著下降的变化趋势, 大小差异顺序均为: 稻田 > 休耕地 > 沙地。种稻后土壤硝态氮和有效钾含量以及速效氮、有效磷和有效钾分配比例较种稻前显著下降, 休耕前后无明显变化规律。不同处理间土壤全磷、全钾、铵态氮、速效氮和有效磷含量差异不显著。休耕后土壤氮磷钾库间存在显著正相关关系, 休耕土壤氮磷钾库容与C/N和含水量存在极显著正相关关系, C/N和含水量可作为表征休耕地土壤养分变化的敏感指标。

关键词

水稻土, 土壤有效养分, 土壤全量养分, 荒漠化治理, 科尔沁沙地

Effects of Fallow on Soil Nitrogen, Phosphorus and Potassium Storage Capacity in Sandy Paddy Field Lined with Film

Lin Sun, Yang Ou, Fei Yu, Lei Liang*

College of Environment, Liaoning University, Shenyang Liaoning

Received: Mar. 5th, 2022; accepted: Apr. 5th, 2022; published: Apr. 12th, 2022

Abstract

In order to provide scientific basis for desertification control, soil nitrogen, phosphorus and po-

*通讯作者。

文章引用: 孙琳, 欧阳, 于飞, 梁雷. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤氮磷钾库容的影响[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(4): 440-447. DOI: 10.12677/ag.2022.124045

tassium pools affected by continuous planting of film lined rice and fallow after planting film lined rice need to be studied in Horqin. Taking the unrepaired sandy land in the study area as the control, the contents of soil total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus and available potassium in 0~15 and 15~30 cm soil layers after continuous rice planting and rice planting were measured, and the correlation between nitrogen, phosphorus and potassium storage capacity of fallow soil and environmental factors was analyzed. The results showed that planting rice and fallow had a significant effect on the content of soil nitrogen, phosphorus and potassium pool. The content of soil total nitrogen and C/N increased significantly at first and then decreased significantly. The order of difference was: paddy field > fallow farmland > sandy land. After planting rice, the content of soil nitrate nitrogen and available potassium and the distribution proportion of available nitrogen, available phosphorus and available potassium decreased significantly compared with that before planting rice, and there was no obvious change law before and after fallow. There was no significant difference in the contents of total phosphorus, total potassium, ammonium nitrogen, available nitrogen and available phosphorus among different treatments. After fallow, there is a significant positive correlation between soil nitrogen, phosphorus and potassium pools. There is a very significant positive correlation between fallow soil nitrogen, phosphorus and potassium pool capacity and C/N and water content. C/N and water content can be used as sensitive indicators to characterize the changes of soil nutrients in fallow.

Keywords

Paddy Soil, Soil Available Nutrients, Soil Total Nutrients, Desertification Control, Horqin Sandy Land

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是荒漠化最严重的国家之一,第五次全国土地退化和荒漠化调查情况显示,全国有 261.16 万 km² 的土地沙漠化,占全国土地面积的 27.2% [1]。早在上世纪 60 年代初期,美国学者就尝试使用衬膜技术在沙地种植植物[2]。1986 年,日本学者内岛善兵卫等[3]建立试验小区种植衬膜水稻初步证明了沙地衬膜水稻技术的可行性。同一时期日本学者松岛省三[4]也进行类似试验将衬膜技术应用于沙地。1984 年陈彩富等[5]在宁夏中卫腾格里沙漠利用衬膜技术种植大豆。1991 年内蒙古自治区通辽市农业科学研究院与中科院合作开展科尔沁沙地治理研究,在治沙过程中,严哲洙发明了沙漠水稻种植技术[6]。三十年的防沙治沙实践证明,沙漠衬膜水稻技术可以提高沙漠土壤肥力,同时带动当地经济发展,是有效治理荒漠化的科学途径之一。

前人对荒漠化土壤和衬膜水稻技术领域的研究主要集中在沙漠衬膜水稻栽培[7];沙漠植被种植对沙土的修复效果[8];干旱区土地退化对土壤养分含量的影响[9]等方面,但在植被恢复后沙土肥力状况的评价方面研究较少,尤其缺乏对连续种植衬膜水稻和种稻后休耕沙土养分含量的变化特征的系统研究。针对上述问题,本研究以内蒙古科尔沁沙漠衬膜水稻长期定位试验中 3 个不同处理的沙地试点为对象,分析连续种稻和休耕后土壤氮磷钾库的变化特征及影响因素,探讨衬膜水稻种植和休耕对沙地土壤肥力状况的影响以及休耕后土壤系统的稳定性,为该地的荒漠化治理提供了一定的科学理论依据,为研究沙漠植被恢复机理和修复后土壤生态系统稳定性的维持提供数据参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

试验样地位于科尔沁沙地南部,行政区划隶属于内蒙古自治区通辽市奈曼旗(42°14'40"N~43°32'30"N, 120°19'40"E~121°31'44"E),研究区属于北温带大陆性季风干旱气候,春夏季降水较多,秋冬季降水较少,一年中降水集中在夏季(6~8月),年均降水量 366 mm,年蒸发量 1935 mm。科尔沁沙地年平均气温 6.00°C~6.50°C,无霜期平均约 150 天,全年日照率 66.0%~69.9%,平均每日日照 8.70~9.20 h,年平均风速 3.60~4.10 m·s⁻¹。试验样地土壤类型为风沙土,植被类型主要是黄柳(*Salix gordeivii*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、大针茅(*Stipa grandis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、羊草(*Leymus chinensis*)。

2.2. 样品采集

研究区设置三种处理样地,分别为:沙地(未修复沙漠土壤)、稻田(衬膜水稻修复 8 年土壤)、休耕地(种植衬膜水稻 7 年后休耕 1 年土壤)。以沙地为对照,与稻田水平距离约 20 m,地表平整且无植被覆盖。于 2021 年 9 月,分别在上述 3 个样地中,采用梅花形布点法,选取 5 个 1 m × 1 m 取样点,采集 0~15、15~30 cm 土层土样。将每个采样点 0~15 和 15~30 cm 土层的土壤样品分别均匀混合后,四分法缩分至密封袋中,每个样地重复 3 次。将土样带回实验室,过 2 mm 筛,一部分放入冰箱 4°C 冷藏;另一部分风干后用球磨机研磨待测。

2.3. 测定项目与方法

采用称重法测定土壤含水量;采用无 CO₂ 水浸提(水土比 2.5:1),pH 计测定土壤 pH 值(PHS-25,上海宵盛仪器制造有限公司);采用碳酸氢钠浸提土壤有效磷(AP),钼锑抗比色法测定含量;采用乙酸铵提取土壤有效钾(AK),火焰光度计测定含量[10];采用氯化钾提取土壤硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)[11],连续流动分析仪(AutoAnalyzer3, SEAL, Germany)测定含量;采用三酸消煮法提取土壤全磷(TP)、全钾(TK),5 mL 硫酸-高氯酸(5:1 制成混酸)浸泡土样过夜,第二天加 5 mL 氢氟酸消煮至溶液呈现清亮的淡黄色,流动注射分析仪(QC8500, Lachat Instruments, USA)测定含量;采用元素分析仪(Perkin-Elmer 2400 CHNS/O, Norwalk, CT, USA)测定土壤全氮(TN)含量。

2.4. 数据分析

采用 Origin2018 软件进行绘图。采用 SPSS22.0 数据分析软件中单因素方差分析(one-way ANOVA) Duncan 法检验各土层中沙地、稻田和休耕地土壤氮磷钾库容的差异显著性(P < 0.05), Pearson 相关系数分析休耕土壤氮磷钾库与环境因子的相关性。

3. 结果与分析

3.1. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤氮库的影响

各处理土壤全氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和速效氮(AN)含量以及速效氮分配比例(AN/TN)和碳氮比率(C/N)分别介于 0.64~0.80 g·kg⁻¹、1.80~5.21 mg·kg⁻¹、19.27~20.96 mg·kg⁻¹、21.77~24.74 mg·kg⁻¹、2.8%~3.8%、0.18~0.58 之间,其中 C/N 的变幅最大为 222.2% (图 1)。各土层不同处理下土壤氮库容量的差异性规律不一致,如种稻后土壤 TN 含量和 C/N 显著提高,NO₃⁻-N 含量和速效氮分配比例则显著下降,种稻前后土壤中 NH₄⁺-N 和 AN 含量无显著差异;休耕后 0~15 和 15~30 cm 土层土壤 NO₃⁻-N 含量和 0~15 cm 土层速效氮分配比例显著低于原始沙地,其他指标无显著差异。

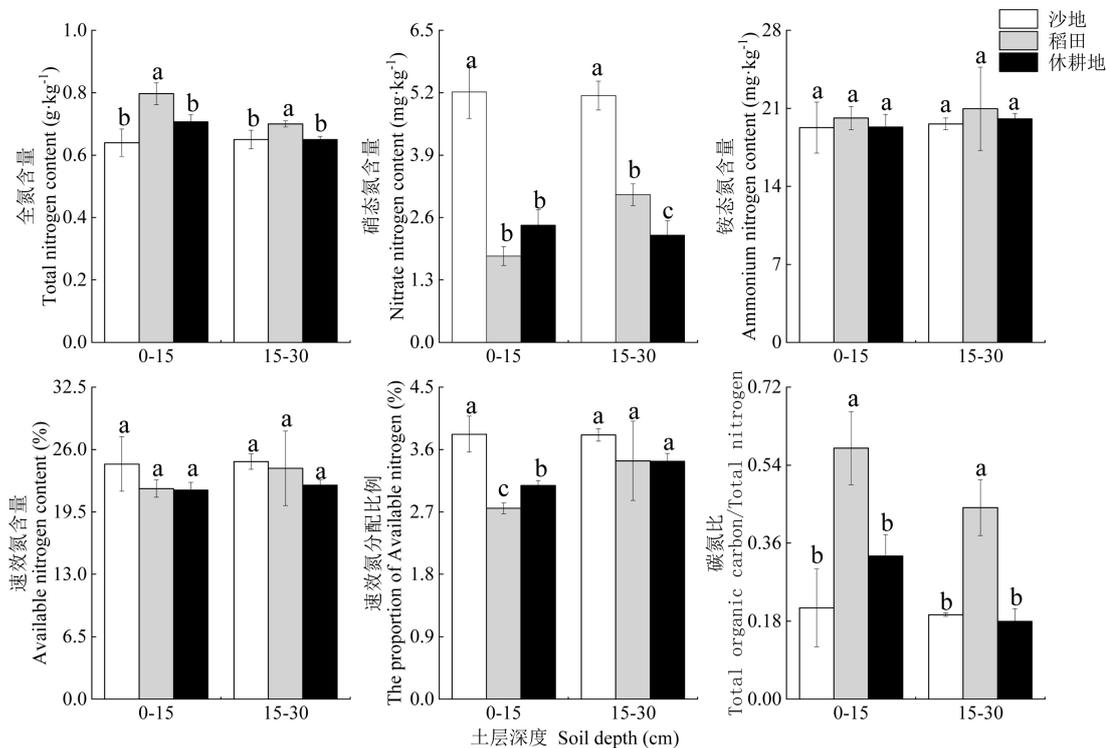


Figure 1. Effects of film lined rice fallow on soil nitrogen pool in sandy land. Different small letters meant significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤氮库的影响。不同小写字母表示处理间的显著差异 ($P < 0.05$)。下同

3.2. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤磷库的影响

各处理土壤全磷(TP)和有效磷(AP)含量及有效磷分配比例(AP/TP)分别介于 0.04~0.07 g·kg⁻¹、1.10~2.21 mg·kg⁻¹、1.7%~4.8%之间, 其中有效磷分配比例的变幅最大为 179.8% (图 2)。0~15 cm 土层中 3 个处理间土壤 TP 含量没有显著差异, 种稻后 TP 含量较沙地增加 83.3%; 休耕后 TP 含量较沙地增加 66.7%; 种稻后有效磷分配比例较沙地显著降低, 休耕后又显著升高; 15~30 cm 土层中 3 个处理间各指标均无显著差异。除沙地土壤 TP 含量、稻田土壤 AP 含量和有效磷分配比例外, 沙地、稻田、休耕地 0~15 cm 土层的磷库指标值均高于 15~30 cm。

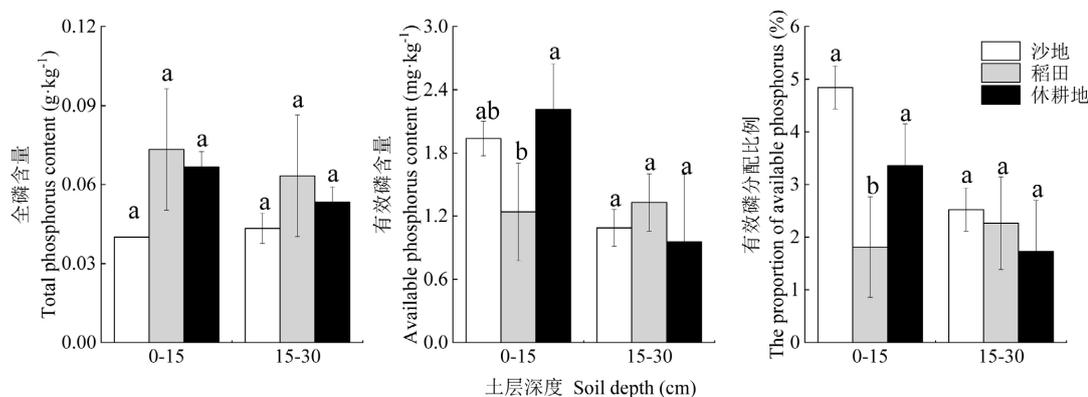


Figure 2. Effects of film lined rice fallow on soil phosphorus pool in sandy land

图 2. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤磷库的影响

3.3. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤钾库的影响

各处理土壤全钾(TK)和有效钾(AK)含量及有效钾分配比例(AK/TK)分别介于 18.92~19.96 g·kg⁻¹、1.60~38.64 mg·kg⁻¹、0.01%~0.2%之间, 其中 AK 含量的变幅最大为 2315.0% (图 3)。0~15 cm 土层沙地、稻田和休耕地间土壤钾库指标没有显著差异; 15~30 cm 土层沙地、稻田和休耕地间土壤 TK 含量无显著差异, AK 含量和有效钾分配比例存在显著差异, 均表现为: 沙地 > 稻田 > 休耕地。除沙地土壤的 AK 含量外, 沙地、稻田、休耕地 0~15 cm 土层的 AK 含量和有效钾分配比例均高于 15~30 cm。

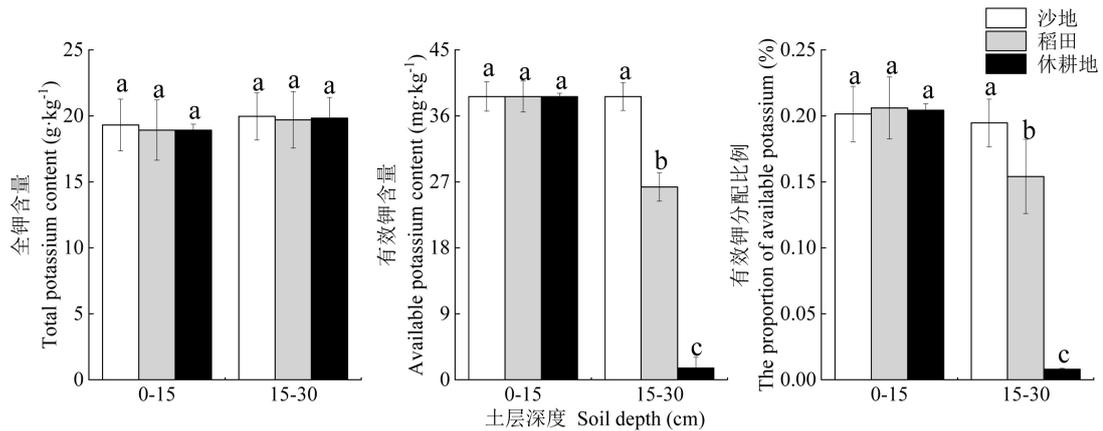


Figure 3. Effects of film lined rice fallow on soil potassium pool in sandy land
图 3. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤钾库的影响

3.4. 土壤氮磷钾库与环境因子的相关性分析

沙地衬膜水稻休耕土壤氮库中, TN 含量与含水量和 AK 含量显著正相关, 与 C/N 具有极显著正相关关系(表 1)。NH₄⁺-N 与 AN 含量具有极显著正相关关系。C/N 与 TP 含量具有显著正相关关系, 与 TN、和 AK 含量以及含水量具有极显著正相关关系。土壤磷库中, TP 含量与 C/N 和含水量以及 AK 含量具有显著正相关关系。AP 含量与 AK 含量以及含水量具有显著正相关关系。土壤钾库中 AK 含量与 TN、TP 和 AP 含量具有显著正相关关系, 与 C/N 以及含水量具有极显著正相关关系。

Table 1. Correlation coefficients among soil nitrogen, phosphorus and potassium pool and environmental factors
表 1. 土壤氮磷钾库与环境因子的相关系数

项目 Item	土壤氮库 Soil nitrogen pool					土壤磷库 Soil phosphorus pool		土壤钾库 Soil potassium pool	
	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	AN	C/N	TP	AP	TK	AK
含水量	0.890*	0.385	-0.454	-0.419	0.984**	0.816*	0.816*	-0.433	1.000**
pH	0.368	-0.617	0.679	0.607	0.135	0	0.002	-0.136	0.066
TN	1	0.012	-0.13	-0.164	0.939**	0.705	0.728	-0.573	0.890*
NO ₃ ⁻ -N	0.012	1	-0.765	-0.55	0.233	0.049	0.238	0.449	0.385
NH ₄ ⁺ -N	-0.13	-0.765	1	0.959**	-0.339	-0.373	-0.649	0.125	-0.454
AN	-0.164	-0.55	0.959**	1	-0.337	-0.462	-0.737	0.361	-0.419
C/N	0.939**	0.233	-0.339	-0.337	1	0.848*	0.794	-0.541	0.984**

Continued

TP	0.705	0.049	-0.373	-0.462	0.848*	1	0.805	-0.758	0.816*
AP	0.728	0.238	-0.649	-0.737	0.794	0.805	1	-0.674	0.816*
TK	-0.573	0.449	0.125	0.361	-0.541	-0.758	-0.674	1	-0.433
AK	0.890*	0.385	-0.454	-0.419	0.984**	0.816*	0.816*	-0.433	1

*P < 0.05; **P < 0.01。

4. 讨论

4.1. 不同处理对土壤氮磷钾库容的影响

氮、磷、钾是土壤养分三要素，对沙地衬膜水稻的生长发育和生产力有直接影响[12]。全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷和有效钾含量能比较综合的反应土壤肥力状况[13]。本研究中，与沙地相比，种植衬膜水稻能够显著提高全氮含量和 C/N，分别增加 24.5%和 174.8%，这与川西北高寒沙地的研究结果一致[14]；此外种稻后全磷和铵态氮含量也略有升高，但差异性不显著。各土层不同处理土壤全氮、全磷、铵态氮含量和 C/N 大小差异顺序均表现为稻田 > 休耕地 > 沙地。可能是由于衬膜水稻种植能防风固沙，固氮固碳，反过来提供适宜植物生长发育的水肥条件，进而增加有机物料返还量，最终促进稻田耕作层土壤碳氮磷含量及其化学计量比率的提高[15]。沙化使土表侵蚀加剧，休耕后沙土表面生物量覆盖不足 10%，很少或几乎没有动植物残留体返回土壤，干旱区氮磷素不可逆转的流失，可能是休耕后土壤全氮和全磷含量降低的主要原因之一。当 C/N 质量比值大于 25 时土壤中的有机质积累。我国农田 C/N 值一般是 7~13，荒漠草原生物结皮下土壤 C/N 值达 11~15，自然湿润温带土壤 C/N 值在 10~12 左右。研究区土壤碳、氮营养结构失衡，风化土壤有机质分解迅速，衬膜水稻修复过程各阶段土壤 C/N 值(0.18~0.58)均远低于一般耕地。

土壤中硝态氮和铵态氮含量一般占速效氮的 90%以上，说明植物吸收氮素最主要的来源是土壤中铵离子和硝酸盐[16]。科尔沁沙地土壤中的速效氮以铵态氮为主，随着修复的进行，土壤中硝态氮含量和速效氮分配比例显著下降，这与在西双版纳热带森林[17]和哀牢山木果柯林[18]中的研究结果一致。与种稻前后硝态氮含量变化趋势相比，种稻后速效氮含量虽略有下降，但无显著差异性。与赵溪等[19]的研究结果一致，本研究中硝态氮较铵态氮受环境影响的变化幅度大，而罗达等[20]得出与之相反的结论，这可能与土壤处理方式的不同有关。

土壤有效磷含量和有效磷分配比例的变化趋势相似，0~15 cm 土层中表现为先下降后升高；15~30 cm 土层中无显著差别，水稻对土壤磷素中有效磷的吸收，可能是休耕过程中有效磷含量变化的原因之一。不同处理间 0~15 cm 土层土壤钾库容量无显著的差异，15~30 cm 土层中全钾含量无明显变化，有效钾含量和有效钾分配比例大小差异顺序均表现为：沙地 > 稻田 > 休耕地。王箐等[21]认为有效钾含量在长期施肥条件下有降低的趋势，可能是导致各处理间土壤有效钾与全钾含量表现不同的原因之一。此外，李娜等[22]还认为有效钾含量变化与土壤质地有关，黏粒对有效钾的吸附能力强。

4.2. 不同处理下土壤氮磷钾库和环境因子的相关性分析

本研究中，衬膜水稻休耕期间土壤环境因子与土壤氮磷钾库容间存在显著相关性，这与前人的研究结果相符。余济云等[23]认为交错带人工林土壤全量养分与有效养分间均呈强的正相关关系。休耕后土壤氮磷钾等肥力指标间的影响，可能是因为土壤中微生物的分解代谢作用使土壤氮磷钾库容同步变化[24]。

本研究还发现，休耕土壤 C/N、含水量与土壤氮磷钾库容均存在极显著正相关关系，表征休耕土壤

养分动态变化。刘玉林等[25]认为土壤氮库容量与含水量存在正相关关系($P > 0.05$)。周志文等[26]认为土壤氮库容与 C/N 呈极显著正相关。休耕土壤中 C/N 和含水量对土壤氮磷钾含量的影响,可能是因为水分是控制土壤有机质分解转化和积累的重要环境因子[27],且土地退化与土壤氮磷钾的损失密切相关[28]。

5. 结论

3 个处理中土壤 C/N 和全氮含量大小差异顺序为:稻田 > 休耕地 > 沙地,总体呈先显著升高后显著下降的变化趋势。与种稻前相比,种稻后土壤硝态氮、有效钾、速效氮分配比例、有效磷分配比例和有效钾分配比例显著下降,休耕前后变化幅度较小。不同处理间土壤全磷、全钾、铵态氮、速效氮和有效磷含量差异不显著。种稻后土壤肥力变化趋势为全量养分含量增加,有效养分含量下降;休耕后土壤养分含量与非修复沙地养分含量接近。因此不能通过自然演替过程使沙地衬膜水稻田休耕地土壤质量恢复成草原土壤水平,需要在作物收获后人为干预,通过人工植草使植被覆盖休耕地,达到减少土壤水肥流失促进演替的目的。

土壤氮磷钾库与环境因子的相关性分析显示,沙地衬膜水稻休耕土壤氮库中, TN 含量与 C/N 具有极显著正相关关系且相关性最强, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 AN 含量具有极显著正相关关系且相关性最强, C/N 与 AK 含量以及含水量具有极显著正相关关系且相关性最强。土壤磷库中, TP 含量与 C/N 具有显著正相关关系且相关性最强, AP 含量与 AK 含量以及含水量具有显著正相关关系且相关性最强。土壤钾库中, AK 含量与含水量具有极显著正相关关系且相关性最强。

参考文献

- [1] 屠志方, 李梦先, 孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J]. 林业资源管理, 2016(1): 1-5+13.
- [2] 张雄, 山颖, 张继平, 吕向荣, 李富国. 沙地衬膜水稻施肥效应与技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 139-142.
- [3] 内岛善兵卫, 章庆辰, 高素华. 农业与气候[J]. 新疆气象, 1986(1): 61-66.
- [4] 松岛省三, 杨春和. 理想水稻栽培技术概要[J]. 北方水稻, 1978(1): 43-47.
- [5] 陈彩富, 钱太涛. 流动沙丘的改良利用与经济效益——以沙坡头地区为例[J]. 中国沙漠, 1984(3): 40-48.
- [6] 包红霞, 张力焱, 王健, 王宏伟, 塔娜. 沙漠种稻技术研究进展[J]. 北方水稻, 2019, 49(6): 58-60.
- [7] 窦瑞霞, 孙玉梅. 沙地衬膜水稻栽培技术[J]. 现代农业, 2017(10): 51.
- [8] 阎德仁, 任天忠. 沙地衬膜水稻土壤养分变化分析[J]. 内蒙古林业, 1998(10): 28.
- [9] 吴秀芝, 阎欣, 王波, 刘任涛, 安慧. 荒漠草地沙漠化对土壤养分和胞外酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1082-1088.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] Raymond, B.W. and Claude, E.G. (1987) Automated Method for Determining Nitrate and Nitrite in Water and Soil Extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **18**, 625-636. <https://doi.org/10.1080/00103628709367847>
- [12] 陈建国, 张杨珠, 曾希柏, 谭周进, 周清. 平衡施肥对缺磷红壤性水稻土的生态效应[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1877-1887.
- [13] 杨家慧, 谭伟, 冯艳. 不同龄组柳杉人工林土壤肥力特征[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(5): 505-514.
- [14] 李森, 李玲, 樊华, 罗雪梅, 苟小林, 涂卫国. 川西北高寒沙地不同生态治理模式下土壤碳氮磷储量及生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2567-2573.
- [15] 欧延升, 汪霞, 李佳, 贾海霞, 赵云飞, 黄政, 洪苗苗. 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 38-45.
- [16] 张继舟, 倪红伟, 王建波, 袁磊, 王宏韬. 模拟氮沉降和 CO_2 浓度增加对三江平原小叶章群落土壤总有机碳和氮素含量的影响[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 216-225.

- [17] 沙丽清, 孟盈, 冯志立, 郑征, 曹敏, 刘宏茂. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究[J]. 植物生态学报, 2000(2): 152-156.
- [18] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉. 哀牢山木果柯林及其退化植被下土壤无机氮库的干季动态特征[J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 210-217.
- [19] 赵溪, 李君剑, 李洪建. 关帝山不同植被恢复类型对土壤碳、氮含量及微生物数量的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2102-2110.
- [20] 罗达, 史作民, 李东胜. 枯落物处理对格木林土壤碳氮转化和微生物群落结构的短期影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2259-2268.
- [21] 王箐, 鲁剑巍, 张文君, 李小坤. 田间土壤钾素有效性影响因素及其评估[J]. 土壤, 2012, 44(6): 898-904.
- [22] 李娜, 韩立思, 吴正超, 王月, 兰宇, 韩晓日. 长期定位施肥对棕壤钾素吸附解吸动力学特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(21): 4396-4402.
- [23] 余济云, 叶道碧. 长沙市城乡交错带 4 种人工林土壤养分及其相关性研究[J]. 林业资源管理, 2010(2): 57-61.
- [24] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
- [25] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 陈磊, 上官周平. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2163-2172.
- [26] 周志文, 潘剑君, 居为民, 郭沂林, 葛序娟, 尹正宇, 王恒钦. 神农架不同坡位 3 种林型土壤碳氮比分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 210-217.
- [27] Qiang, F., Zhao, W., Yang, Q., Zhao, M. and Zhong, L. (2013) Spatial Heterogeneity of Soil Moisture and the Scale Variability of Its Influencing Factors: A Case Study in the Loess Plateau of China. *Water*, **5**, 1226-1242. <https://doi.org/10.3390/w5031226>
- [28] Elliot, E.T. (1986) Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **50**, 627-633. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>