添加生物质炭对旱地红壤中硝态氮水平运移的影响

韩召强[1]，陈效民[1]，陶朋闯[1]，靳泽文[1]，张晓玲[1]，黄欠如[2]

(1.南京农业大学 资源与环境科学学院，江苏 南京 210095；2.江西红壤研究所，江西 进贤 331717)

摘　要：[目的] 探讨不同生物质炭施用量条件下旱地红壤中 NO_3^--N 的含量及水平运移规律，为该地区的农田水分管理和环境保护提供科学依据。[方法] 采用室内水平扩散率仪测定不同生物质炭施用量〔C_0(0 t/hm^2，不施用生物质炭)，C_1(2.5 t/hm^2)，C_2(5 t/hm^2)，C_3(10 t/hm^2)，C_4(20 t/hm^2)，C_5(30 t/hm^2)和 C_6(40 t/hm^2)〕条件下土壤中硝态氮水平运移速率和运移浓度。[结果] 生物质炭施用对土壤中硝态氮的水平运移速率和水平运移浓度影响显著。随着生物质炭施用量的增加，硝态氮的水平运移速率和水平运移浓度呈先增加后降低的趋势，而土壤水扩散率呈逐渐降低趋势。C_5(30 t/hm^2)处理下硝态氮的水平运移速率和水平运移浓度均出现最大值，分别为 0.67 cm/min，165.52 mg/kg。随着生物质炭施用量的继续增加，C_6(40 t/hm^2)处理的硝态氮的水平运移速率和水平运移浓度较 C_5(30 t/hm^2)处理有所降低，硝态氮浓度最大值均出现在湿润峰峰面上。分析影响硝态氮水平运移规律的因素表明，生物质炭降低了土壤的容重、增加了土壤有机碳和孔隙度，从而导致了各处理硝态氮的水平运移规律发生了变化。[结论] 生物质炭可以改善土壤的理化性状，促进硝态氮的水平运移，在利用生物质炭改良旱地红壤理化性状的同时，也要注意防止氮素流失对环境的影响，降低其对地表水的潜在污染风险。

关键词：生物质炭；红壤；硝态氮；水平运移

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2017)04-0047-05　　**中图分类号**：S153.3

文献参数：韩召强，陈效民，陶朋闯，等.添加生物质炭对旱地红壤中硝态氮水平运移的影响[J].水土保持通报，2017，37(4)：47-51. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.008；Han Zhaoqiang，Chen Xiaomin，Tao Pengchuang，et al. Effects of biochar addition on horizontal transport of NO_3^--N in upland red soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(4)：47-51. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.008

Effects of Biochar Addition on Horizontal Transport of NO_3^--N in Upland Red Soil

HAN Zhaoqiang[1]，CHEN Xiaomin[1]，TAO Pengchuang[1]，
JIN Zewen[1]，ZHANG Xiaoling[1]，HUANG Qianru[2]

(1. *College of Resources and Environmental Sciences，Nanjing Agricultural University，Nanjing，Jiangsu* 210095，*China*；2. *Red Soil Institute，Jinxian，Jiangxi* 331717，*China*)

Abstract：[Objective] This experiment studied the effects of biochar addition on the content and horizontal transport of NO_3^--N in upland red soil in laboratory to provide scientific bases for water management and environmental protection in the fields. [Methods] Moisture diffusion rate meter was used to determine the horizontal transport velocity and concentration of NO_3^--N in soil at biochar addition rates of 0，5，10，20，30 and 40 t/hm^2. [Results] The horizontal transport velocity and concentration of NO_3^--N were significantly affected by biochar addition. A same trend，which performed an increase at first and then a decrease with the biochar application rate increased，was found in the horizontal transport velocity and concentration of NO_3^--N

收稿日期：2016-11-14　　**修回日期**：2016-12-30

资助项目：国家重点研发计划项目“耕地地力影响化肥养分利用的机制与调控”(2016YFD0200305)；江西省科技支撑项目(20151BBF60060)。

第一作者：韩召强(1992—)，男(汉族)，山东省济宁市人，硕士研究生，研究方向为水土资源利用及旱地红壤改良。E-mail：2015103064@njau.edu.cn。

通讯作者：陈效民(1957—)，男(汉族)，江苏省张家港市人，博士，教授，博士生导师，主要从事水土资源与环境物理过程研究。E-mail：xmchen@njau.edu.cn。

in soil and the diffusivity decreased with the increasing rate of biochar addition. When the application rate of biochar was 30 t/hm^2, the horizontal transport velocity and concentration of NO_3^--N in soil got the highest, which were 0.67 cm/min and 165.52 mg/kg, respectively. When the application rate of biochar was 40 t/hm^2, the horizontal transport velocity and concentration of NO_3^--N were lower than those of 30 t/hm^2. The transport concentration of NO_3^--N reached the maximum value at the surface of wet spearhead in all treatments, which existing on the interface between wet and dry soil. Biochar addition decreased the soil bulk density but increased the soil organic carbon content and total porosity so as to the horizontal transport of NO_3^--N in different treatments were changeable. [Conclusion] Biochar addition can improve the soil properties, and promote the horizontal transport of NO_3^--N in upland red soil. It is very important to pay attention to prevent the pollution of leaching loss of nitrogen and reduce the potential risk of surface water.

Keywords: biochar; red soil; nitrate nitrogen; horizontal transport

氮素是作物生长发育的必需营养元素,在作物生长发育过程中,氮素参与作物新陈代谢的所有过程。施肥是农业增产的重要措施,随着农业的持续发展和集约化程度的不断提高,氮肥的施用量近年来呈逐年上升的趋势。氮肥中的氮素主要以铵态氮的形式存在,虽然土壤对铵态氮有很强的吸附作用,但铵态氮可转化为不易被土壤所吸附的硝态氮[1],且硝态氮极易从土壤中流失,导致周边地表水和地下水中的氮化合物含量不断上升,并逐渐达到危险水平,从而引起水体的富营养化等问题[2]。因此,研究硝态氮在农田土壤中的水平运移规律具有重要的意义。生物质炭是由有机物料在厌氧条件下经低温热解产生的含碳丰富的固态物质,是黑碳的一种存在形式。生物质炭孔隙度高、比表面积大、带负电荷多、芳香化程度也高、且具有较高的稳定性和吸附性[3]。另外,它具有改善土壤质量和保持土壤肥力等诸多作用[4]。随着生物质炭用于改良土壤研究的深入,人们发现生物质炭能够提高土壤对氮素养分的吸附,降低土壤养分的流失[5]。生物质炭通过固持土壤氮素养分,从而有效减少由于降雨造成的氮素流失,提高表土层养分固持能力。红壤是我国热带和亚热带地区的地带性土壤,在强烈的风化和淋溶作用下其自然肥力低下[6],再加上长期不合理的耕作方式造成土壤质地黏重,通气透水性差。近年来,红壤地区的农民为了追求作物高产而大量施用化肥,而施用常规的化肥不但无法达到提高土壤肥力的目的,且过高的氮肥施用量造成了氮素的流失,污染了大气和水体的环境[7],因此施用稳定性高的生物质炭可能是改善这类土壤肥力的重要方式。大量研究表明[8-9],生物质炭作为土壤改良剂对缓解农田氮素流失引起的面源污染具有重要的现实意义。但是,目前仍缺乏生物质炭施用对红壤中硝态氮运移影响的研究。因此,本文以小麦秸秆制备的生物质炭为对象,利用室内水平土柱模拟试验,探讨不同量生物质炭施入红壤后对硝态氮水平运移的影响,从而揭示添加生物质炭后红壤中硝态氮的水平运移规律,以期为该地区的农田水分管理和环境保护等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在江西省红壤研究所(116°20′24″E,28°15′30″N),为典型低山丘陵红壤区,属亚热带湿润气候,年均气温 17.5℃,年均日照时间 1 900～2 000 h,年无霜期 282 d。年降雨量 1 587 mm,年蒸发量 1 100～1 200 mm,干湿季节明显,降雨主要集中在 3—6 月,占全年雨量 61%～69%;7—9 月为旱季,蒸发量占全年蒸发量的 40%～50%,供试土壤由第四纪红色黏土发育而来。

1.2 供试土壤及生物质炭

供试土壤采样的土层深度为 0—15 cm. 土壤的基本性质如下:土壤 pH 值 4.54,全氮 0.98 g/kg,阳离子交换量 15.2 cmol/kg,有效磷 13.26 mg/kg,有机碳 7.98 g/kg,全磷 0.45 g/kg,总孔隙度 53.6%,容重 1.23 g/cm^3,黏粒含量 316.0 g/kg,粉砂粒含量 391.2 g/kg,砂粒含量 292.8 g/kg。本研究采用的生物质炭来自于河南商丘三利新能源有限公司,原料为小麦秸秆,炭化温度为 500 ℃,小麦秸秆的 35%被转化为生物质炭,生物质炭的 pH 10.35,阳离子交换量 217.0 cmol/kg,有效磷 4.7 g/kg,有机碳 467.1 g/kg,全氮 5.9 g/kg,容重 0.45 g/cm^3,比表面积 8.9 m^2/g。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质的测定方法[10]:土壤容重采用环刀法测定;土壤颗粒分析采用吸管法测定,质地采用国际制分类;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;硝态氮采用 $CaSO_4$ 浸提—紫外分光光度计法测

定;阳离子交换量采用 1 mol/L 乙酸铵交换法测定;土壤水分扩散率测定详见参考文献[11]。

1.4　土壤中硝态氮水平运移试验

1.4.1　*试验装置*　室内水平扩散率仪装置如图 1 所示。采用长 100 cm、宽 20 cm、高 10 cm 的长方形有机玻璃扩散槽,通过马氏瓶控制水头并以入渗土体悬殊的厚长比来消除重力势和压力势对水分入渗的影响,使入渗水分在土样基质吸力作用下作水平入渗,以模拟田间水平入渗(图 1)。

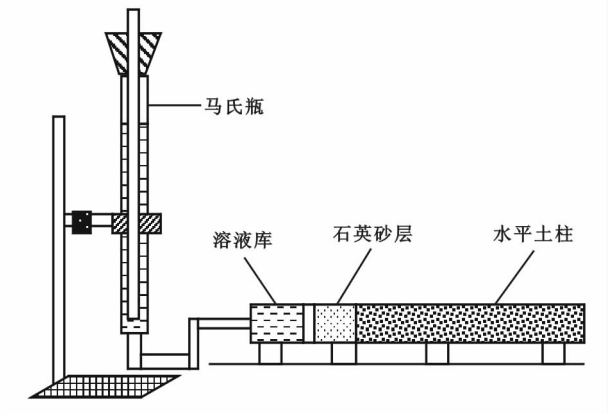


图 1　土壤水分扩散率装置示意图

1.4.2　*硝态氮的水平扩散试验*　采集不同生物质炭施用量〔C_0(0 t/hm^2,不施用生物质炭),C_1(2.5 t/hm^2),C_2(5 t/hm^2),C_3(10 t/hm^2),C_4(20 t/hm^2),C_5(30 t/hm^2),C_6(40 t/hm^2)〕土壤样品(其中 C_1 处理由于生物质炭施用量太少,对试验结果影响不显著,因此本文没有对该用量进行分析),除去植物根系及石块后将所采集的土壤风干、研磨,并全部通过 20 目筛,按田间实测的容重称取 14.76,14.64,14.64,14.52,14.41,14.28 kg 分别填装入水平扩散率仪中,各处理的土壤性质详见表 1。配制浓度为 200 mg/L 的硝态氮溶液作为示踪液,用马氏瓶控制水头,进行硝态氮水平扩散试验。当硝态氮水平运移的湿润峰到达 4,8,12,16,20,24,28,32,36,40,44,48,52,56,60 cm 时,分别记录时间。当湿润峰到达约 60 cm左右时,停止硝态氮水平运移,自湿润峰处端开始将土柱分成 4 cm 的小段,立即用取样器依次分段取样,测定土壤含水量和土壤样品的硝态氮浓度,每个处理分别测定 3 次重复。

1.5　数据处理

采用 Excel 2013 软件对数据进行处理和作图,采用 DPS 数据处理系统进行方差分析和多重比较(α=0.05)。采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行相关性分析(α=0.05)。

表 1　不同处理土壤基本理化性质

处理	容重/(g·cm^{-3})	孔隙度/%	有机碳含量/(g·kg^{-1})	阳离子交换量/(cmol·kg^{-1})
CK	1.23	53.6	7.98	16.20
C_1	1.23	53.7	7.99	16.25
C_2	1.22	54.1	9.38	16.59
C_3	1.22	54.8	10.25	17.58
C_4	1.21	55.9	11.79	18.84
C_5	1.20	56.7	12.62	19.73
C_6	1.19	57.5	13.16	21.32

2　结果与分析

2.1　生物质炭对硝态氮水平运移速率的影响

水平扩散率仪中的硝态氮水平运移受溶质的浓度梯度、土壤基质势以及水势梯度的多重影响。在硝态氮运移过程中,硝态氮的运移速率随着运移距离的增加而逐渐减小,因此可以通过运移速率随着运移距离变化的规律研究施用生物质炭对硝态氮水平运移速率的影响。不同生物质炭处理下变化趋势基本相同,其运移速率与运移的距离呈幂函数关系(图 2)。

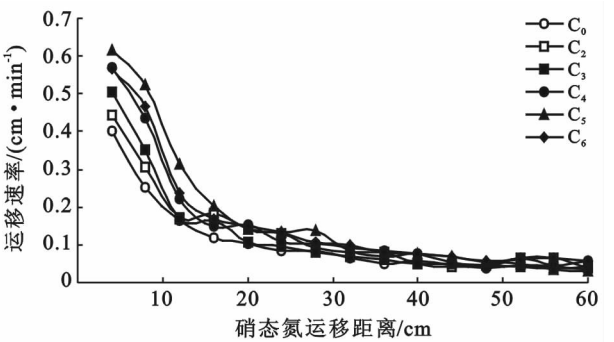


图 2　不同生物炭施用量硝态氮运移速率与运移距离关系

经统计分析,6 个处理下硝态氮水平运移速率与运移距离的相关关系均达到了极显著水平(相关系数分别为:r_0=0.992 8**,r_2=0.961 2**,r_3=0.992 2**,r_4=0.976 6**,r_5=0.977 9**,r_6=0.991 6**,n=15)。由图 2 可知,生物质炭施用量不同,各处理的硝态氮运移曲线也发生了分异。在 4 cm 处,所有处理的硝态氮水平运移均较快,CK 处理中硝态氮的水平运移速率最小为 0.44 cm/min,而 C_5 处理中硝态氮的水平运移速率最大为 0.62 cm/min。与 CK 处理相比,施用生物质炭的其他 5 个处理(C_2,C_3,C_4,C_5 和 C_6)运移速率均显著上升(p<0.05),其增幅分别为:10.72%,25.94%,42.39%,53.62%和 40.65%,其中 C_5 处理达到最大值为 0.62 cm/min。在 0—20 cm 区间内,除了 C_6 处理外,其他处理硝态氮的水平运移

速率均随施炭量的不断增加而呈增加趋势，当生物质炭施用量达到 40 t/hm²（C_6 处理）时，与 C_5 处理相比，硝态氮的水平运移速率整体出现降低的趋势。所有处理硝态氮的水平运移速率随运移距离的整体变化基本一致，即在 0—20 cm 区间内 6 个处理硝态氮的运移速率迅速下降，在 20 cm 处，所有处理的硝态氮运移曲线基本接近并开始汇聚。20—60 cm 区间内硝态氮的运移速率趋于平缓，在 60 cm 处各处理的硝态氮水平运移速率最低，接近于零。

2.2 生物质炭对硝态氮水平运移浓度的影响

土壤含水量、非饱和浓度梯度、土壤水扩散率和生物质炭的吸附作用等对硝态氮水平运移浓度影响较大，其中，硝态氮水平运移浓度随土壤含水量增加而降低。由硝态氮水平运移浓度和土壤含水量之间的关系可以更好的得出施用生物质炭对硝态氮在土体的水平运移产生重要影响。不同生物质炭处理下土壤含水量与硝态氮运移浓度关系的变化趋势基本上一致，均呈负幂函数变化（图 3），二者的相关系数均达到极显著水平（不同生物质炭处理下硝态氮水平运移浓度与土壤含水量的相关系数 r 分别为 $r_0=0.948\ 0^{**}$，$r_2=0.911\ 5^{**}$，$r_3=0.841\ 8^{**}$，$r_4=0.958\ 1^{**}$，$r_5=0.894\ 8^{**}$，$r_6=0.981\ 9^{**}$，$n=15$）。随着土壤含水量的增加，硝态氮的水平运移浓度不断降低。由图 3 可知，所有处理的硝态氮浓度最大值均出现在湿润峰峰面上。C_5 处理的硝态氮浓度最大值为 165.52 mg/kg，也是所有处理中的最高值，并且其整体硝态氮浓度也要比其他处理高；CK 处理的硝态氮浓度最大值为 145.23 mg/kg，是所有处理中的最低值。与 CK 处理相比，其它施用生物质炭的 5 个处理（C_2，C_3，C_4，C_5 和 C_6）的湿润峰峰值均有不同幅度的增加，其增幅分别为：3.74%，10.61%，12.66%，13.97%和 10.31%。在硝态氮运移浓度随土壤含水量变化曲线中，C_5 处理的整体硝态氮浓度较其它处理表现为最高。

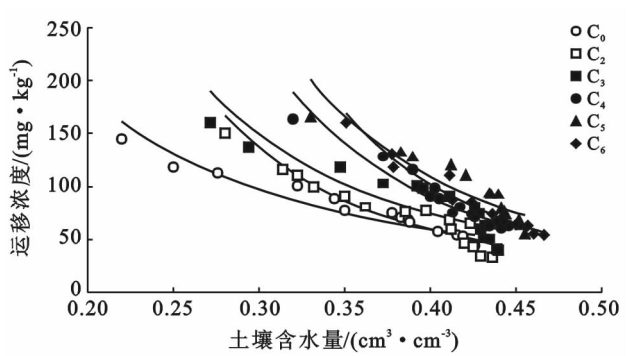


图 3 不同生物炭施用量土壤含水量对硝态氮水平运移浓度的影响

2.3 生物质炭对土壤水扩散率的影响

非饱和土壤水扩散率与土壤水分密切相关，其随土壤含水量的增加而增加。水平方向上的非饱和土壤扩散率实际上反映了土壤水分在水平方向上运移的轨迹，即水流主要流动方向的扩散状况。硝态氮在土壤中水平运动时，其浓度受到非饱和土壤扩散率的影响，随土壤水分扩散率的升高而下降，并呈对数曲线变化（图 4）。土壤水扩散率与对应的硝态氮浓度相关系数在各处理中均达到极显著水平（不同生物质炭处理土壤水扩散率与硝态氮的水平运移浓度的相关系数 r 分别为 $r_0=0.854\ 8^{**}$，$r_2=0.939\ 8^{**}$，$r_3=0.859\ 9^{**}$，$r_4=0.850\ 2^{**}$，$r_5=0.827\ 9^{**}$，$r_6=0.688\ 7^{**}$，$n=15$）。由图 4 可知：土壤水扩散率随着生物质炭施用量的增加呈逐渐降低的趋势。当土壤水扩散率小于 2 cm³/min 时，硝态氮的水平运移浓度随土壤水扩散率的增大而急剧减小，当土壤水扩散率大于 2 cm³/min 时，硝态氮的水平运移浓度随土壤扩散率的增大变化幅度趋于平稳。

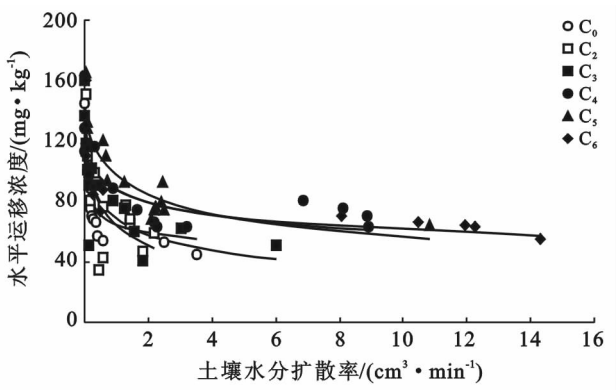


图 4 不同生物炭施用量硝态氮水平运移浓度与土壤水分扩散率的关系

3 讨论与结论

硝态氮是一种非吸附的溶质，不易被分配到土壤的吸附位点上，因此土壤孔隙、容重及质地等物理特性是影响硝态氮在土壤中水平运移的主导因素。本试验中，处理 CK 硝态氮的运移速率和运移浓度最小，这是因为 CK 处理无生物质炭施入，红壤自身容重大及孔隙度低的特点阻碍了硝态氮在土壤中的运移。而生物质炭施入土壤后，由于生物质炭颗粒较粗，可以改善红壤质地较为黏细，结构较差，大孔隙比例较低的特性，增加了样品中大孔隙的比例[12]。并且其多孔高比表面特征，对土壤容重有降低效果。土壤中存在明显的大孔隙时溶质便会优先穿越，此时吸附作用对溶质运移的影响作用将会较小[13]，致使硝

态氮在土壤中运移速率和运移浓度增大,当生物质炭施入量为 30 t/hm^2 时这种效果促进最为明显。另外,土壤基质势也是影响硝态氮在土壤水分扩散装置中运移的重要因素。土壤基质势是由土壤基质的吸附力和毛管力造成的势能,是硝态氮在土壤中水平运移的水平吸力,主要受到土壤容重和孔隙度的影响。生物质炭的施入使土壤通气状况得到改善且土壤水分入渗率增大,这使得硝态氮在运移过程中所受到的土壤基质势和水势梯度大大增加,导致硝态氮水平运移速率和浓度不断提高。

本研究发现,当生物质炭施入量为 40 t/hm^2 时,硝态氮的水平运移速率和水平运移浓度较 30 t/hm^2 均出现显著降低的趋势($p<0.05$),这与 Lehmann 等[14]研究发现生物质炭对 NO_3^--N 具有相当强的吸附性,显著减少土壤养分流失的研究结果一致。生物质炭不仅具有负电荷也具有正电荷,可提高 AEC 含量[15]。其次,生物质炭表面积大,外表凸凹不平,存在各种大小孔隙,使其具有高电荷密度[16],能够吸附固定水、土壤或沉积物中无机离子 NO_3^--N[17]。同时,生物质炭增加了土壤离子交换位点,不但具有离子吸附交换能力而且具有一定的吸附容量,在提高对营养元素(NO_3^-)的吸附能力的基础上增加养分的有效性。因此,当生物质炭的施用量达到 40 t/hm^2 时,其产生的高吸附性能在溶质运移的过程中占主导地位,使硝态氮在运移的过程中不断的被吸附在生物质炭的表面,导致硝态氮的水平运移速率和水平运移浓度降低。另外,生物质炭通过孔隙结构为微生物提供了生活场所,可以通过静电吸附养分离子及活跃的化学官能团对硝态氮进行吸附,并减缓氮素向外界释放,增强土壤对溶液中移动性很强和容易淋失养分元素的吸附能力[18]。

非饱和土壤水扩散率,又叫扩散度或扩散系数,它是运用土壤水动力学基本原理建立土壤水运动的数学模型。硝态氮在土壤中作水平运移时,其浓度受到非饱和土壤扩散率的影响,随土壤水分扩散率的降低而增大。在本研究中,随着生物质炭施用量的增加,土壤水扩散率较 CK 呈不断降低的趋势,这是因为生物质炭通过直接和间接作用影响了土壤水的扩散过程。一方面,生物质炭可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度和饱和导水率,使土壤的通气透水性得到改善,在相同类型的土壤中,土壤容重越小,孔隙度越大,土壤中的机械弥散作用就越小,从而导致土壤水扩散率变小。另一方面,生物质炭发达的孔隙结构使其存在着各种大小不一的孔隙,且其比表面积大,表面具有大量负电荷及高电荷密度的特点[18]增加了土壤胶体的含量。有研究[19]表明,土壤水分扩散率受土壤胶体影响较大,土壤胶体的晶格表面容易与水分子结合形成氢键而束缚水的运动,其水分子也会被束缚在胶体表面,从而降低胶体表面水的活度。生物质炭施入土壤后使土壤水在运动的过程中被束缚在胶体表面的水分子不断增多,从而导致了土壤水扩散率不断降低。

本研究采集不同生物质炭施用量的土壤进行室内水平运移模拟试验,以研究施用生物质炭对旱地红壤硝态氮的水平运移过程。研究结果表明,在旱地红壤中,与 CK 处理相比,施用生物质炭的 5 个处理的硝态氮水平运移速率和水平运移浓度均显著提高($p<0.05$)。当生物质炭施用量≤30 t/hm^2 时,随着生物质炭施用量的增加,硝态氮水平运移速率和水平运移浓度均表现为上升趋势,C_5 处理的变化曲线整体表现为最大,当生物质炭施用量为 40 t/hm^2 时(C_6 处理),与 C_5 处理相比,这种促进作用有所减弱。因此,在利用生物质炭改良旱地红壤理化性状的同时,也要注意防范氮素流失对环境的影响,降低其对地表水的潜在污染风险。

[参 考 文 献]

[1] 靖彦,陈效民,李秋霞,等.生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):265-269.

[2] 张福珠,熊先哲,戴同顺,等.应用^{15}N 研究土壤—植物系统中氮素淋失动态[J].环境科学,1984(1):23-26.

[3] Renner R. Rethinking biochar[J]. Environmental Science and Technology, 2007,41(17):5932-5933.

[4] Topoliantz S, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005,41(1):15-21.

[5] 刘玮晶,刘烨,高晓荔,等.外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(5):962-968.

[6] He Yuangqiu, Li Zhiming. Nutrient cycling and balance in red soil agroecosystem and their management[J]. Pedosphere, 2000,10(2):107-116.

[7] 朱建国.硝态氮污染危害与研究展望[J].土壤学报,1995,32(S2):62-68.

[8] 王辉,王全九,邵明安.人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J].农业工程学报,2006,22(6):39-44.

[9] 吴发启,范文波.坡耕地土壤结皮形成的影响因素分析[J].水土保持学报,2002,16(1):33-36.

[10] 鲍士旦,江荣风,杨超光,等.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1999:30-34.

[11] 雷志栋,杨诗秀,谢传森.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:233-234.

(下转第 57 页)

平评价指标体系,并采用因子分析法诊断农村生态文明建设水平是合理可行的。

[参 考 文 献]

[1] 李平星,陈雯,高金龙.江苏省生态文明建设水平指标体系构建与评估[J].生态学杂志,2015,34(1):295-302.

[2] 张艳,何爱平.生态文明建设的理论基础及其路径选择[J].西北大学学报:哲学社会科学版,2016,46(2):120-125.

[3] 陈巍,李烨,郑华伟.基于改进灰靶模型的农村生态文明建设差异分析[J].水土保持通报,2016,36(4):90-96.

[4] Foster J B. Ecology against capitalism[M]. New York: Monthly Review Press, 2002.

[5] Kemp R, Pontoglio S. The innovation effects of environmental policy instruments: A typical case of the blind men and the elephant? [J]. Ecological Economics, 2011,72(12):28-36.

[6] 林爱广.中国生态文明建设及路径研究[D].杭州:浙江农林大学,2013.

[7] Zhang Lei, Zhang Dayong. Relationship between Ecological Civilization and Balanced Population Development in China[J]. Energy Procedia, 2011(5):2532-2535.

[8] 张欢,成金华,陈军,等.中国省域生态文明建设差异分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(6):22-29.

[9] 吴小节,彭韵妍,汪秀琼.中国生态文明发展状况的时空演变与驱动因素[J].干旱区资源与环境,2016,30(8):1-9.

[10] 袁晓玲,景行军,李政大.中国生态文明及其区域差异研究[J].审计与经济研究,2016(1):92-101.

[11] 郑子峰.福建省农村生态文明建设面临的问题及对策研究[J].福建农林大学学报:哲学社会科学版,2014,17(1):68-71.

[12] 刘海涛.我国农村生态文明建设问题研究[D].济南:山东师范大学,2014.

[13] 赵明霞,包景岭.农村生态文明建设的评价指标体系构建研究[J].环境科学与管理,2015,40(2):131-135.

[14] 刘晓光,侯晓菁.中国农村生态文明建设政策的制度分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(11):105-112.

[15] 文高辉,杨钢桥,李文静,等.基于农民视角的农地整理项目绩效评价及其障碍因子诊断[J].资源科学,2014,36(1):26-34.

[16] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M].3 版.北京:电子工业出版社,2013.

[17] 杨永梅,郭志林,洪荣昌,等.基于因子分析的格尔木市郊工程移民满意度评价[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):38-43.

[18] 方凯,王厚俊.基于因子分析的农村公共品农民满意度评价研究[J].农业技术经济,2012(6):30-36.

[19] 杨东红,郝广,刘宏伟.基于因子分析的企业员工知识满意度影响因素分析[J].哈尔滨商业大学学报:社会科学版,2015(6):46-52.

[20] 戚晓明.基于因子分析的农村义务教育家长满意度研究[J].江苏社会科学,2015(5):248-254.

[21] 李伟,燕星池,华凡凡.基于因子分析的农村公共品需求满意度研究[J].统计与信息论坛,2014,29(5):78-84.

[22] 罗文斌,吴次芳,倪尧,等.基于农户满意度的土地整理项目绩效评价及区域差异研究[J].中国人口·资源与环境,2013,23(8):68-74.

[23] 江苏省统计局.江苏统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.

(上接第 51 页)

[12] 靳泽文,陈效民,李秋霞,等.生物质炭对旱地红壤理化性状和水力学特性的影响[J].水土保持通报,2015,35(6),81-85.

[13] 李文娟,颜永毫,郑纪勇,等.生物炭对黄土高原不同质地土壤中 NO_3-N 运移特征的影响[J].水土保持究,2013,20(5):60-63.

[14] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. Biology & Fertility of Soils, 2002,35(4):219-230.

[15] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitra-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. Bioresource Technology, 2001, 95(3):255-257.

[16] Ding Ying, Liu Yuxue, Wu Weixiang, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2010,213(1):47-55.

[17] 刘玉学,刘微,吴伟祥,等.土壤生物质炭环境行为与环境效应[J].应用生态学报,2009,20(4):977-982.

[18] 靖彦,陈效民,李秋霞,等.施用生物质炭对红壤中硝态氮垂直运移的影响及其模拟[J].应用生态学报,2014,25(11):3161-3167.

[19] 熊毅,陈家坊.土壤胶体,土壤胶体的性质(第 3 册)[J].北京:科学出版社,1990:157-212.