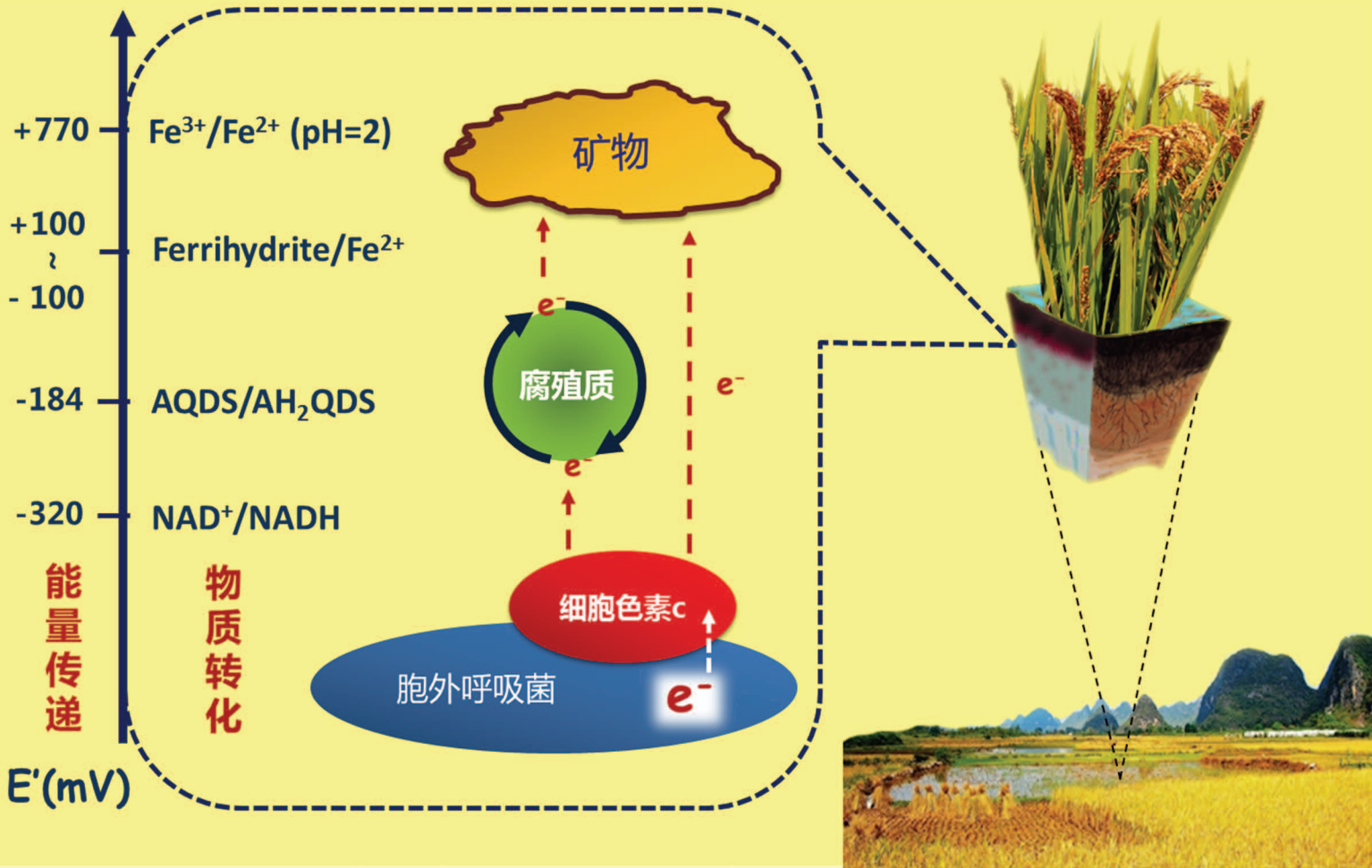


# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办  
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## 目 次

### 综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)  
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

### 新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

### 研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 $S_3$ 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)  
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)  
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)  
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)  
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)  
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)  
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)  
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)  
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)  
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)  
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)  
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)  
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)  
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)  
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)  
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)  
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)  
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)  
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)  
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)  
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)  
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

### 研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)  
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

### 信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201506010162

# 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响\*

赵金花<sup>1, 2</sup> 张丛志<sup>2</sup> 张佳宝<sup>1, 2†</sup>

(1 河南粮食作物协同创新中心小麦玉米作物学国家重点实验室(河南农业大学农学院), 郑州 450002)

(2 封丘农田生态系统国家试验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要** 针对目前黄淮海平原潮土区普遍实施的覆盖式秸秆还田所存在的主要问题, 本研究提出了基于氮肥激发的秸秆深埋还田技术, 并通过连续4年(2011—2014)的大田定位试验进行检验。系统比较了秸秆移除、秸秆覆盖还田、激发式秸秆深还(秸秆与无机氮肥或有机氮肥配施进行深埋, 并于行间种植作物)的3种秸秆还田方式对土壤养分和冬小麦产量的影响。结果表明: 激发式秸秆深还在各项土壤养分指标和冬小麦产量方面均有显著优势, 该处理能够显著增加土壤有机质、微生物生物量碳、微生物生物量氮、土壤全氮和土壤硝态氮含量, 并显著提升冬小麦产量。其中无机氮肥激发秸秆深还处理能显著增加土壤硝态氮含量和冬小麦有效穗数, 从而显著提升冬小麦产量。而有机氮肥激发的秸秆深还处理主要通过提升土壤有机质, 增加冬小麦千粒重来增加产量。所有处理中16%无机氮肥激发的秸秆深还冬小麦产量最高。

**关键词** 秸秆深还; 激发效应; 土壤养分; 产量因素; 冬小麦

**中图分类号** S152.4 **文献标识码** A

黄淮海平原潮土地区是我国小麦的重要产区, 由于其水热条件适宜, 土壤呼吸强度大, 导致土壤有机质含量普遍较低且难于累积。中国科学院封丘农田生态系统国家试验站长达20多年的长期定位施肥试验表明, 增施秸秆堆腐形成的有机肥能显著提升土壤有机质含量<sup>[1]</sup>, 并对作物产量产生显著影响; 陈金等<sup>[2]</sup>认为秸秆还田可增加表层土壤无机氮含量; Beare等<sup>[3]</sup>认为秸秆还田能够将秸秆中含有的C、N、P、K等营养元素归还到土壤中, 提高土壤肥力; 武际等<sup>[4]</sup>的研究表明, 连续的秸秆覆盖还田可以促进土壤无机氮的供应, 提高作物产量。可见秸秆还田是一项培肥地力, 增加作物产量的有效途径。

尽管近年来秸秆还田得到了普遍地推广和重

视, 但目前的秸秆还田技术仍然存在诸多问题, 例如: 目前秸秆还田以覆盖还田为主, 存在着腐解慢、矿化养分不能及时被当季作物利用、影响耕作出苗和易发病虫害等问题<sup>[5]</sup>, 常规堆肥产生的堆腐效应对秸秆进行腐熟化处理, 能够较好的解决上述问题, 但是不易于大量秸秆的实际田间生产操作。而田间开沟进行秸秆集中深还, 表面再覆土镇压, 使得秸秆在腐解时热量难以散失, 在田间形成一条自然的秸秆堆腐带, 在腐熟秸秆提高土壤有机质的同时促进作物产量的提升<sup>[6-7]</sup>。但普通的秸秆深还研究主要关注秸秆掩埋深度的问题, 例如李波等<sup>[8]</sup>将稻秆与土从盆顶端向下混合翻埋, 设置4个翻埋深度来研究稻秆还田深度对盆栽冬小麦结构和生理特性的影响。Bingemann等<sup>[9]</sup>提出的激

\* 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDB15030302, XDA0505050203)、国家自然科学基金项目(41471182)共同资助 Supported by the Strategic Pilot and Technology Special Funds of the Chinese Academy of Sciences (Nos. XDB15030302, XDA0505050203) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41471182)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jbzhang@mail.issas.ac.cn

作者简介: 赵金花(1991—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机质等方面的研究。E-mail: zhao.jinhua.123@163.com

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-07-22



发效应能进一步加速深还秸秆的腐解，其原理在于将外源氮肥与秸秆配施于田间，利用土层积温、土壤水分、微生物活动的共同作用，加速秸秆腐解，增加土壤养分<sup>[10]</sup>。秸秆还田的激发效应前人已有研究，如杨滨娟等<sup>[11]</sup>发现玉米秸秆配施化肥调节其C/N能够提高土壤微生物生物量水平，调控土壤养分；马超等<sup>[12]</sup>认为秸秆促腐还田更有利于提高土壤养分含量；胡玮等<sup>[13]</sup>指出秸秆、猪粪和化肥配施（C/N为12.5）能显著增加土壤养分和小麦产量。可见堆腐效应和激发效应在秸秆还田提升土壤地力和作物产量方面均具有重要作用，但是将这两种效应耦合起来并在田间进行操作的相关研究鲜有报道。此外，在利用外源氮素（有机肥或化肥）来进行激发式秸秆深还时，如何协调秸秆腐解和作物生长竞争性消耗土壤氮素的关系，即如何分配激发效应腐解秸秆所需的氮素和供应作物生长所消耗的氮素是利用激发式秸秆深还提升作物产量的关键。因此，本研究利用4年田间定位试验，探讨激发式秸秆深还对土壤养分和作物产量及其构成因素的影响机制，明确最佳的激发式秸秆深还所需的氮素分配比例，以期为黄淮海平原潮土地区农田土壤地力的提升和我国粮食安全的保障提供基础数据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于河南省封丘县中国科学院封丘农业生态系统国家试验站（35°01'N，114°32'E）。该地区属于半干旱半湿润的暖温带季风气候，年平均降水615mm，67%的降水集中在6—9月；平均气温为13.9℃，最低月均气温出现在1月，为-1.0℃，最高月均气温27.2℃，出现在7月。该区域土壤发育为黄河冲积物潮土，试验初耕层土壤的基本肥力指标为：有机质8.00 g kg<sup>-1</sup>，全氮0.54 g kg<sup>-1</sup>，全磷0.86 g kg<sup>-1</sup>，全钾19.17 g kg<sup>-1</sup>，碱解氮40.92 mg kg<sup>-1</sup>，有效磷16.71 mg kg<sup>-1</sup>，速效钾63.67 mg kg<sup>-1</sup>，pH 8.57。

### 1.2 试验设计

试验共设计3种秸秆还田方式：（1）秸秆移除（NSF0，NSFR），上季作物收获后人工将秸秆移出小区；（2）常规覆盖还田（SF0），将上一季玉米秸秆切成20~50 mm长条后直接均匀覆盖

于土壤表面；（3）秸秆深还，包含常规秸秆深还（ISFR）和激发式秸秆深还，其中常规秸秆深还是在小麦播种前于种植行间开挖40 cm深、25 cm宽的条沟埋入经粉碎过的秸秆，播种3行小麦掩埋1行秸秆。而激发式秸秆深还则是在行间埋入的秸秆上撒施精制有机肥或无机氮肥后进行掩埋，且精制有机肥或无机氮肥设置3个施用梯度，分别占总施氮量的8%、16%和24%。因此，共设10个处理（表1）。

每个处理设置4个重复，每个小区区长8 m，宽5 m，周围被1 m深水泥挡板隔离，该挡板深入地下80 cm并高出地面20 cm。供试小麦品种为郑麦9023，为河南当地种植面积最大的品种之一，该品种属于弱春性，一般每公顷成穗525万株左右，株高80~85 cm，全生育期约230d。小麦整个生育期施氮总量为210 kg hm<sup>-2</sup>，磷、钾分别为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 157 kg hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 105 kg hm<sup>-2</sup>，NSFR和ISFR处理氮肥均按照基追比4:6均匀撒播在小区内，其余处理分别按照设置的氮肥配比于播种前随秸秆埋入行间（激发式秸秆深还），剩余氮肥全部用化学氮肥于拔节期追施，磷钾肥则作为基肥一次性施入。供试玉米秸秆有机碳含量为433.9 g kg<sup>-1</sup>，有机氮肥（鸡粪）有机碳含量为276.0 g kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 测定指标及方法

每年小麦成熟期（6月1日）分别采集植株样品（1 m × 1 m正方形样方）和耕层（0~20 cm）土壤样品，每个小区随机采取5个10 cm宽且覆盖秸秆深还及小麦种植区的土壤条带，将所采土样充分混匀后取500 g样品带回实验室保存，采样深度为0~20 cm，采集的土壤样品为包含秸秆深还区和小麦种植区的混合取样，然后根据分析需求进行预处理。采用高温外加热重铬酸钾氧化—容量法测定土壤有机质含量，半微量凯氏法测定全氮含量，氯仿熏蒸浸提法测定微生物量碳氮含量，紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量（土:KCl=1:5）。收获每个小区小麦籽粒并称量即为小区产量，小麦产量构成数据由每个小区中采集的样方获得，调查样方中小麦穗头数即为有效穗数，采取样方中长势均匀的麦穗5个，测定每穗粒数并求取平均值即为小麦穗粒数，取五组1 000粒长势均匀的小麦籽粒称重，其平均值即为小麦千粒重。

### 1.4 数据分析

试验数据采用SPSS19.0软件进行统计分析，

表1 试验设计及肥料施用量

**Table 1** Experimental design and fertilizer application rates

处理 Treatment	秸秆还田方式 Mode of straw returning	有机氮 Organic nitrogen	无机氮 Inorganic nitrogen	总氮量 Total N	磷肥 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) P fertilizer	钾肥 (K <sub>2</sub> O) K fertilizer
(kg hm <sup>-2</sup> )						
NSF0	秸秆移除Straw removal	0	0	0	0	0
SF0	秸秆覆盖Straw mulching	0	0	0	0	0
NSFR	秸秆移除Straw removal	0	210	210	157.5	105
ISFR	秸秆深还Deep burial of straw	0	210	210	157.5	105
ISOM1	秸秆深还+8%有机氮 <sup>①</sup>	16.80	193.2	210	157.5	105
ISOM2	秸秆深还+16%有机氮 <sup>②</sup>	33.60	176.4	210	157.5	105
ISOM3	秸秆深还+24%有机氮 <sup>③</sup>	50.40	159.6	210	157.5	105
ISF1	秸秆深还+8%无机氮 <sup>④</sup>	16.80	193.2	210	157.5	105
ISF2	秸秆深还+16%无机氮 <sup>⑤</sup>	33.60	176.4	210	157.5	105
ISF3	秸秆深还+24%无机氮 <sup>⑥</sup>	50.40	159.6	210	157.5	105

①Deep burial of straw + 8% organic nitrogen; ②Deep burial of straw +16% organic nitrogen; ③Deep burial of straw +24% organic nitrogen; ④Deep burial of straw + 8% inorganic nitrogen; ⑤Deep burial of straw +16% inorganic nitrogen; ⑥Deep burial of straw +24% inorganic nitrogen

单因素方差分析多重比较采用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD)。

## 2 结果

### 2.1 激发式秸秆深还对土壤养分的影响

土壤有机质、微生物生物量碳、微生物生物量氮、全氮和硝态氮等养分指标是衡量土壤地力的重要指标,不同处理下2011年和2014年土壤养分数据如表2所示。从同一年份不同试验处理的土壤养分指标的差异可以看出,施肥及秸秆还田处理均能提高土壤养分含量,激发式秸秆深还方式提升效果最显著,其中无机氮肥处理主要是增加硝态氮含量,有机氮肥处理则在其他土壤养分指标上有较大贡献。从同一试验处理不同年份的数据变化来看,与2011年相比,2014年NSF0处理各项土壤养分含量均大幅降低,SF0处理全氮含量减少,而其余处理则能使各项土壤养分含量显著增加。

**2.1.1 有机质** 土壤有机质的变化随着试验年份和处理差异相应地发生变化(表2):(1)在同一试验年份,土壤有机质含量秸秆还田处理(S和IS)高于秸秆移除处理(NS)。2014年,与NSF0处理相比,ISOM和ISF处理土壤有机质增幅分别为49.32%~60.84%和42.14%~43.90%,可见秸秆还

田能显著提高土壤有机质含量;(2)在激发式秸秆深还条件下,有机氮肥处理(ISOM)有机质含量显著高于无机氮肥处理(ISF),且随着有机氮肥施用量的增加而增加;(3)比较同一试验处理发现,经过连续4年的试验处理,除NSF0处理有机质含量下降外,其余处理均有不同幅度的增加;(4)从2014年ISFR、ISF1、ISF2、ISF3处理来看(利用激发效应腐解秸秆所施加的无机氮素分别为总施氮量的0%、8%、16%、24%),土壤有机质呈现逐渐增加趋势。

**2.1.2 微生物生物量碳氮** 如表2所示,不同处理对土壤微生物生物量碳氮(MBC和MBN)的影响具有显著差异:(1)与NSF0处理相比,秸秆还田和施肥措施均能显著提高土壤微生物生物量碳(MBC)含量,至2014年,仅秸秆覆盖(SF0)可使MBC增加37.50%,单一施肥(NSFR)条件下MBC增幅达55.86%,秸秆深还(ISFR)可使MBC含量增加71.26%。与NSF0相比,无机氮肥和有机氮肥激发式秸秆深还(ISF和ISOM)均能显著提高土壤MBC含量。尽管与ISFR处理相比,MBC在ISF处理中无显著差异,但ISOM处理对MBC的提升范围为11.97%~20.66%,表明ISOM处理对土壤MBC含量的增加效果最优;(2)从土壤微生物生物量氮(MBN)含量的数据变化可以看出,同一处理

年度间变化不显著，但是相同年份不同处理之间则呈现出显著差异，表现为ISOM > ISF > ISFR > NSFR > SF0 > NSF0，其中ISOM处理至2014年土壤MBN含量是NSF0的3倍，增量最显著，且在ISOM处理中，16%的有机氮肥配比土壤MBN含量最高，而在ISF处理（ISFR、ISF1、ISF2和ISF3）中，在2011和2014年，土壤MBN含量均呈现为ISFR < ISF1 < ISF2 < ISF3，随着无机氮素配比（0%、8%、16%、24%）的增加而递增。

**2.1.3 全氮及硝态氮** 与土壤有机质和土壤微生物生物量碳氮变化相似，不同处理和试验年份对土壤全氮及硝态氮含量具有显著影响（表2）：

（1）同一试验年份，土壤全氮含量表现为ISOM > ISF > ISFR > NSFR > SF0 > NSF0，而土壤硝态氮含量表现为ISF > ISOM > ISFR > NSFR > SF0 > NSF0，表明秸秆还田和施肥措施均能提高土壤全氮及硝态氮含量，且激发式秸秆深还增加效果达到显著水平。至2014年，与NSF0处理相比，ISOM处理土壤全氮增幅达90.90%；ISOM和ISF处理之间的土壤全氮和硝态氮的差异表明有机氮肥主要促进土壤全氮累积，而无机氮肥主要促进土壤硝态氮累积，这与有机肥的长效性和化肥的速效性表现一致；（2）不同试验年份，除NSF0和SF0处理土壤全氮含量降低外，其余处理均有不同程度增加。单一的秸秆还田难以维持土壤全氮含量，只是缓解其衰减进程，只有外源氮素输入才能对土壤全氮的累积产生正效应；与NSF0和SF0处理相比，激发式秸秆深还（ISOM和ISF）能在常规施肥处理（NSFR和ISFR）基础上进一步促进土壤全氮的累积；（3）随着试验时间的延长，激发式秸秆深还的逐年累积及腐解效应能显著提高耕层土壤硝态氮含量，且无机氮肥处理（ISF）硝态氮含量显著高于有机氮肥处理（ISOM），表明无机氮肥为土壤提供速效养分的能力高于有机氮肥。

## 2.2 激发式秸秆深还对小麦产量及其构成因素的影响

**2.2.1 小麦产量** 从2011年到2014年，不施肥（NSF0和SF0）处理小麦产量显著降低，其中NSF0处理在2014年减产157.7%（图1），但在试验初始秸秆还田处理（SF0）小麦产量显著低于秸秆移除处理（NSF0）。然而，之后从2012年开始，SF0处理始终高于NSF0，且优势越来越显著，说明秸秆腐解程度和还田时间的持续增加能够提高土壤

各项养分指标含量，最终能够提高作物产量。

在常规施肥条件下，ISFR处理小麦产量显著高于NSFR处理，增产率为1.60%~5.90%，其原因在于秸秆还田能提升土壤有机质含量（表2），进而提高土壤肥力，实现增产。从处理时间来看，小麦产量呈连续增加趋势，与2011年相比，2014年ISFR和NSFR处理小麦产量分别提高30.83%和28.91%，表明秸秆深还能够提升土壤有机质含量并有效避免秸秆常规覆盖还田引起的小麦减产问题，增加作物产量。

在6个激发式秸秆深还处理（ISOM和ISF）中，秸秆深还配比16%的氮肥处理（ISOM2和ISF2）激发效应最优。在同一氮肥配比激发条件下，无机氮肥的激发效果优于有机氮肥，而且随着试验年限的增长，差异越来越显著，2011—2014年ISF2处理较ISOM2处理小麦产量分别提高1.60%、0.12%、5.10%、6.70%，小麦产量数据表明秸秆深还与化肥的激发效应具有耦合作用<sup>[22]</sup>，在秸秆深还的基础上施加化肥能进一步提高小麦产量；此外，秸秆深还配比16%的氮肥处理（ISOM2和ISF2）小麦产量高于配比24%的氮肥处理，其原因在于秸秆腐解和作物生长竞争性消耗土壤氮素，而ISOM3和ISF3处理中激发秸秆腐解消耗了总施氮量24%的氮肥，相对地降低了小麦生长所需的氮素。

**2.2.2 小麦产量的构成因素** 不同处理各年份有效穗数变化规律如表3所示：（1）在不施肥条件下，试验初始年份2011年有效穗数NSF0 > SF0，这与秸秆覆盖影响冬小麦冬前出苗和分蘖有关，从2012年开始，NSF0 < SF0，其原因为秸秆腐解增加了土壤有机质（表2）和土壤氮素含量，有利于小麦的出苗及分蘖；（2）在常规施肥条件下，有效穗数ISFR处理始终高于NSFR处理，且各处理有效穗数随年际变化呈增加的趋势，表明秸秆深还能有效避免秸秆覆盖还田影响出苗的缺陷；（3）在激发式秸秆深还处理（ISOM和ISF）中，相同氮肥配比条件下，小麦有效穗数无机氮肥（ISF）处理高于有机氮肥（ISOM）处理，且其差异逐年增加，这与土壤硝态氮指标的变化趋势一致，表明土壤硝态氮含量影响小麦有效穗数；（4）从逐年数据来看，小麦有效穗数是影响小麦产量的主要因素，其与小麦产量的变化趋势呈极显著正相关关系（ $y=8.30x-13.85$ ， $R^2=0.96$ ， $p<0.01$ ）。



表2 不同处理对土壤养分的影响

Table 2 Effect of treatment on soil nutrients

处理 Treatment	有机质 (g kg <sup>-1</sup> ) Organic matter				微生物生物量碳 (mg kg <sup>-1</sup> ) Microbial biomass carbon				微生物生物量氮 (mg kg <sup>-1</sup> ) Microbial biomass nitrogen				全氮 (g kg <sup>-1</sup> ) Total N				硝态氮 (mg kg <sup>-1</sup> ) Nitrate-N			
	2011年 Year 2011		2014年 Year 2014		2011年 Year 2011		2014年 Year 2014		2011年 Year 2011		2014年 Year 2014		2011年 Year 2011		2014年 Year 2014		2011年 Year 2011		2014年 Year 2014	
	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year
NSF0	7.68 ± 0.09d	7.38 ± 0.22g	184.80 ± 2.34e	163.00 ± 2.05g	37.00 ± 2.34g	26.00 ± 2.05g	0.46 ± 0.01e	0.33 ± 0.02e	5.83 ± 0.77c	5.41 ± 0.87d										
SF0	7.81 ± 0.38d	8.73 ± 0.15f	217.10 ± 0.27d	224.24 ± 3.45f	43.00 ± 0.27f	47.00 ± 3.45f	0.51 ± 0.01d	0.44 ± 0.01d	5.84 ± 0.75c	6.89 ± 0.40cd										
NSFR	7.95 ± 0.21cd	8.75 ± 0.20f	220.40 ± 8.11d	254.05 ± 5.87e	57.40 ± 8.11e	56.40 ± 5.87e	0.53 ± 0.01d	0.54 ± 0.02c	6.86 ± 0.25b	7.07 ± 1.09c										
ISFR	7.96 ± 0.10cd	9.93 ± 0.04e	223.50 ± 6.02d	279.15 ± 2.44d	64.90 ± 6.02d	66.30 ± 2.44d	0.56 ± 0.01c	0.59 ± 0.03b	6.97 ± 0.35b	7.10 ± 1.02c										
ISOM1	8.58 ± 0.19ab	11.02 ± 0.25bc	281.60 ± 3.11a	352.68 ± 6.02ab	68.90 ± 3.11c	74.24 ± 6.02b	0.61 ± 0.02ab	0.63 ± 0.01a	7.28 ± 0.80b	7.18 ± 0.45c										
ISOM2	8.68 ± 0.13a	11.12 ± 0.33b	286.30 ± 3.58a	363.82 ± 3.94a	76.07 ± 3.58a	80.01 ± 3.94a	0.62 ± 0.02a	0.63 ± 0.01a	7.44 ± 0.74b	8.00 ± 0.76bc										
ISOM3	8.77 ± 0.17a	11.87 ± 0.11a	286.50 ± 2.94a	344.95 ± 10.50b	75.80 ± 2.94a	78.00 ± 10.50ab	0.62 ± 0.02ab	0.63 ± 0.01a	7.40 ± 0.73b	7.69 ± 0.93bc										
ISF1	8.15 ± 0.09bc	10.49 ± 0.42d	234.90 ± 6.22c	285.24 ± 12.89d	66.22 ± 6.22c	68.00 ± 12.89d	0.59 ± 0.01b	0.61 ± 0.02ab	7.72 ± 0.09ab	9.15 ± 1.66ab										
ISF2	8.30 ± 0.10b	10.59 ± 0.30cd	238.40 ± 5.16c	297.09 ± 15.10cd	70.47 ± 5.16b	72.73 ± 15.10cd	0.59 ± 0.02b	0.61 ± 0.02ab	8.58 ± 0.28a	9.90 ± 0.43a										
ISF3	8.06 ± 0.08bc	10.62 ± 0.30cd	254.20 ± 9.14b	300.58 ± 6.74c	70.90 ± 9.14b	73.54 ± 6.74c	0.59 ± 0.02b	0.61 ± 0.02ab	8.49 ± 0.60a	8.82 ± 1.07ab										

注：表中数据为4次重复平均值；同一列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: The data in the table are means of four replicates; different letters affixed to the data in the same column mean significant differences between treatments ( $p < 0.05$ )

表3 不同处理对不同年份小麦产量构成因素的影响

Table 3 Effect of treatment on yield composition of wheat in different years

处理 Treatment	千粒重1000-Grain weight (g)				有效穗数Number of effective spikes (Million spike hm <sup>-2</sup> )				穗粒数Number of grains per spike			
	2011年 Year 2011		2014年 Year 2014		2011年 Year 2011		2014年 Year 2014		2011年 Year 2011		2014年 Year 2014	
	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year	Year
NSF0	45.76 ± 0.76bc	43.22 ± 0.63e	41.75 ± 0.47c	38.34 ± 0.38c	23.06 ± 0.78c	20.48 ± 0.93e	19.72 ± 0.95e	20.78 ± 0.40d	23.76 ± 0.76d	20.55 ± 0.63f	13.90 ± 0.47e	10.02 ± 0.38e
SF0	45.38 ± 0.20c	44.83 ± 0.47b	42.18 ± 0.19c	40.00 ± 0.18b	22.43 ± 0.51c	22.18 ± 0.34d	20.23 ± 0.81c	23.00 ± 0.71c	22.07 ± 0.20e	20.20 ± 0.47f	14.10 ± 0.19e	12.41 ± 0.18d
NSFR	45.76 ± 0.45bc	46.54 ± 0.45a	46.75 ± 0.37b	46.60 ± 0.43a	35.23 ± 0.95b	37.97 ± 0.83c	42.86 ± 0.94b	49.55 ± 0.18b	33.12 ± 0.45e	32.44 ± 0.45e	31.90 ± 0.37d	33.09 ± 0.43c
ISFR	45.85 ± 0.57bc	46.40 ± 0.48a	46.91 ± 0.34b	46.50 ± 0.57a	35.77 ± 1.48ab	38.11 ± 0.17c	43.02 ± 1.85b	50.85 ± 1.12b	33.10 ± 0.57c	33.32 ± 0.48de	32.00 ± 0.68d	33.40 ± 0.57c
ISOM1	46.36 ± 0.53b	46.56 ± 0.30a	46.93 ± 0.02b	46.83 ± 0.35a	35.94 ± 1.27ab	42.23 ± 0.68b	43.64 ± 1.13b	50.85 ± 1.78b	34.32 ± 0.53b	33.14 ± 0.30de	32.45 ± 0.02cd	33.97 ± 0.35b
ISOM2	47.36 ± 0.42a	46.84 ± 0.39a	47.53 ± 0.28a	46.99 ± 0.22a	35.80 ± 1.24ab	42.02 ± 0.68b	43.17 ± 1.00b	50.93 ± 1.52b	35.10 ± 0.42ab	34.26 ± 0.39bc	34.22 ± 0.28a	34.55 ± 0.22b
ISOM3	46.36 ± 0.42b	47.11 ± 0.24a	47.39 ± 0.44a	47.24 ± 0.47a	35.69 ± 0.68ab	41.38 ± 0.17b	42.82 ± 1.07b	50.53 ± 1.21b	35.00 ± 0.42ab	33.20 ± 0.24de	34.15 ± 0.44a	33.78 ± 0.47bc
ISF1	46.28 ± 0.48bc	46.61 ± 0.61a	47.10 ± 0.68a	46.51 ± 0.68a	36.76 ± 1.21ab	42.23 ± 0.17b	47.40 ± 1.13a	54.09 ± 0.19a	34.99 ± 0.48ab	33.43 ± 0.61cd	33.45 ± 0.34b	34.10 ± 0.68b
ISF2	46.08 ± 0.56bc	46.77 ± 0.04a	47.30 ± 0.45a	46.77 ± 0.33a	37.29 ± 0.33a	43.51 ± 0.51a	47.55 ± 1.70a	55.92 ± 0.43a	35.61 ± 0.56a	35.25 ± 0.04a	34.25 ± 0.45a	35.90 ± 0.33a
ISF3	45.91 ± 0.96bc	46.44 ± 0.40a	47.07 ± 0.37a	46.90 ± 0.83a	36.68 ± 0.68ab	43.94 ± 0.34a	47.05 ± 1.34a	55.06 ± 1.58a	35.38 ± 0.96a	34.36 ± 0.40b	32.85 ± 0.37bc	35.78 ± 0.83a

注：表中数据为4次重复平均值；同一列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: The data in the table are means of four replicates; different letters affixed to the data in the same column mean significant differences between treatments ( $p < 0.05$ )

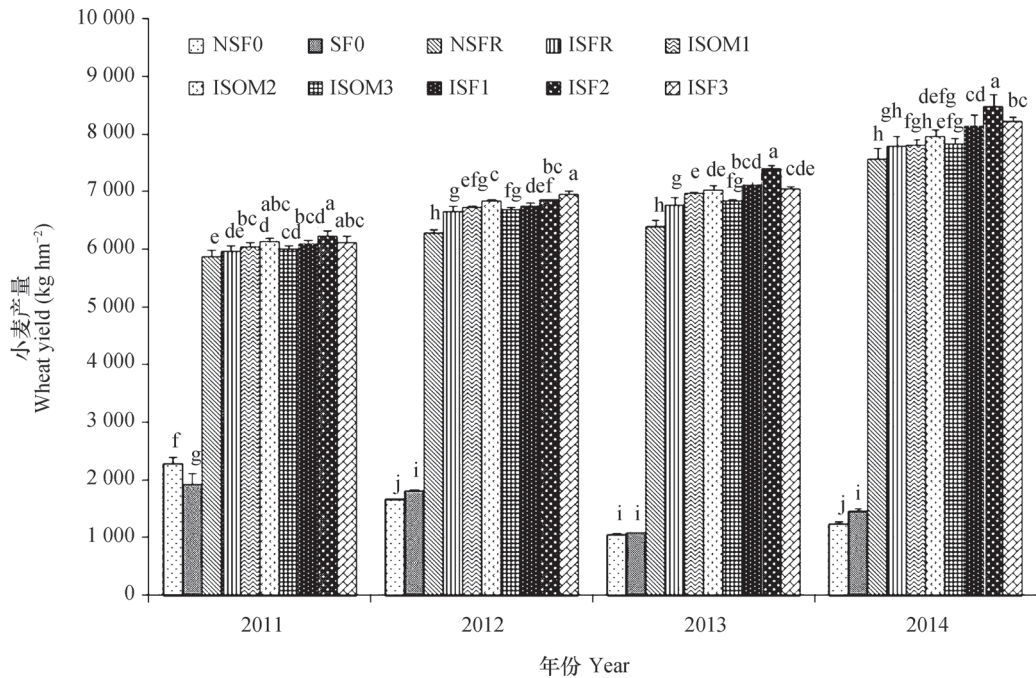


图1 不同处理对小麦产量的影响

Fig. 1 Effect of treatment on wheat yield

从不同处理的小麦穗粒数变化来看（表3）：  
（1）在不施肥条件下，NSF0和SF0处理的穗粒数均逐年降低，与2011年相比，2014年两者降幅分别为57.83%和43.77%。2011年穗粒数SF0处理显著低于NSF0处理，之后两者差距缩小，至2014年SF0处理显著高于NSF0处理，表明秸秆还田对土壤肥力及作物产量的贡献随时间的持续而增加；（2）在施肥条件下，由于秸秆还田方式的不同，不同处理间的穗粒数表现为ISF ≥ ISOM > ISFR > NSFR；此外，在激发式秸秆深还条件下，有机氮肥和无机氮肥激发处理均表现为16%的氮肥配比最好，且无机氮肥对穗粒数的贡献更显著，表明无机氮肥激发更有利于小麦穗粒数的增加；各处理年际变化间差异均未达到显著水平。

如表3所示，各处理小麦千粒重数据表明：

（1）在不施肥条件下，NSF0和SF0处理的千粒重均呈逐年下降趋势，至2014年降幅分别达到16.22%和11.86%，而秸秆还田处理（SF0）自2012年开始一直处于优势地位，表明秸秆还田对稳定小麦千粒重有一定作用；（2）在常规施肥条件下，NSFR和ISFR处理小麦千粒重逐年小幅增加，但未达到统计显著水平（4年增幅分别为1.84%和1.42%），表明秸秆在未激发促腐条件下还田对小麦千粒重的影响不大；（3）在激发式秸秆深还条

件下，有机氮肥（ISOM）与无机氮肥（ISF）处理的激发均有提升小麦千粒重的趋势，但有机氮肥的激发效应优于无机氮肥。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机质

土壤有机质是影响土壤养分和作物产量高低的决定性因子<sup>[14-15]</sup>。从本试验的土壤有机质含量数据可以看出，秸秆还田有利于土壤有机质的增加，而秸秆深还配施氮肥激发条件下其效果更加显著，这可能是一方面由于深层土壤通气性较差，从而避免了秸秆分解以CO<sub>2</sub>的形式释放<sup>[16]</sup>，而更有利于有机质的累积<sup>[17]</sup>，另一方面是本研究将秸秆集中起来深埋入沟内，通过添加外源氮素提升微生物活性进行秸秆促腐，表面再覆土镇压，使得秸秆在腐解时热量难以散失，在作物种植行间形成一条自然堆腐带，所以本研究的激发式的秸秆深还处理具有堆腐效应，而该堆腐效应促进了秸秆向土壤有机质的转化，从而使得秸秆深还有利于土壤有机质的累积。

随着试验年限的增加，有机氮肥激发的秸秆深还措施增幅显著高于无机氮肥，这可能是由于：

（1）有机肥中有机质含量较高，对土壤有机质的



累积有直接补充作用, 而无机氮肥作为速效肥料, 成分单一, 且易挥发和淋溶, 难以持续供应土壤养分; (2) 有机肥中含有能促进秸秆腐解的微生物, 进而促进秸秆的腐解矿化并增加土壤有机质<sup>[18]</sup>; (3) 小麦生长消耗大部分养分, 长期施用无机氮肥会使得土壤C/N降低, 从而加速土壤原有机碳的分解矿化, 最终导致土壤有机质难以累积<sup>[19]</sup>。在利用无机氮肥激发时, 无机氮肥配比小于24%的条件下, 秸秆腐解转化为土壤有机质的数量随着激发消耗氮肥比例的增加而增加, 这可能是由于秸秆中含碳量较高, 施入氮肥调节其C/N, 从而有利于微生物的生长而促进秸秆的腐解。

### 3.2 土壤微生物生物量碳氮

MBC和MBN作为土壤有机质中最活跃的部分, 较其他土壤性质能迅速地响应施肥管理(有机肥和无机肥)的差异<sup>[20-21]</sup>。秸秆还田和有机氮肥的添加为土壤微生物的生长提供了碳氮等能源物质, 从而刺激了微生物的生长和繁殖。土壤微生物在吸收同化碳素的同时, 也固定了部分土壤氮素进行自身细胞物质的构建, 从而导致了MBC和MBN的增加, 加速了作物秸秆的腐解<sup>[22]</sup>。臧逸飞等<sup>[23]</sup>的研究表明施用有机肥处理MBC和MBN显著高于单施无机肥处理。杨滨娟等<sup>[11]</sup>指出秸秆还田配施一定比例的化肥能增加土壤根际微生物数量。但本研究中24%的有机氮肥激发处理(ISOM3)MBC和MBN含量低于16%的处理(ISOM2), 其原因可能为:(1) 秸秆降解需要微生物的参与, 而参与其降解的微生物会与作物的生长竞争消耗土壤氮素<sup>[24]</sup>, 由于秸秆中的碳含量(玉米秸秆有机碳含量为433.9 g kg<sup>-1</sup>)很高, 同时有机氮肥(鸡粪)的碳含量(鸡粪有机碳含量为276.0 g kg<sup>-1</sup>)也很高, 有机氮肥又是直接加入秸秆中的, 因此24%的有机氮肥加入后导致秸秆深还区碳氮比急剧升高, 影响了微生物的活性, 从而出现ISOM3处理的MBC和MBN较ISOM2处理降低的情况;(2) 在本试验中总施氮量一致的条件下, ISOM3处理在前期施入氮素高于ISOM2, 在小麦生育后期ISOM3追施氮量就低于ISOM2, 追施无机氮肥量分别为159.6 kg hm<sup>-2</sup>和176.4 kg hm<sup>-2</sup>, 由于土壤样品于小麦成熟期采集, 可能会造成ISOM3处理的MBC和MBN低于ISOM2处理。

### 3.3 土壤全氮及硝态氮

耕层土壤氮素包含有机态和无机态, 其中土壤硝态氮作为可被旱作作物直接利用的无机态氮素, 是作物氮素营养的重要来源, 作物秸秆还田会影响土壤氮的矿化固持, 进而对土壤无机氮产生影响<sup>[25]</sup>。本研究表明激发式秸秆深还能显著提高土壤全氮及硝态氮含量, 其原因可能为:(1) 秸秆还田配施氮肥可以有效降低土壤的反硝化作用<sup>[26]</sup>;(2) 微生物在分解秸秆时产生的有机物可以提高小麦叶片中硝酸还原酶的活性, 从而促进冬小麦整个生育期对土壤氮素养分的吸收利用<sup>[27]</sup>;(3) 秸秆可以补充土壤全氮的消耗, 且秸秆还田可以起到固定氮肥的作用<sup>[28]</sup>。其中, 有机氮肥激发式秸秆深还(ISOM)主要促进土壤全氮积累, 而无机氮肥激发式秸秆深还(ISF)则有利于土壤硝态氮的增加, 这与有机肥的长效性和化肥的速效性表现一致。

### 3.4 小麦产量

与秸秆深还相比, 秸秆覆盖还田导致产量降低的原因可能为:(1) 秸秆入土深度不足20 cm, 造成土壤空隙大, 从而影响小麦出苗和根系下扎<sup>[29]</sup>;(2) 秸秆表层覆盖还田, 降低表层土壤持水能力, 且秸秆本身及微生物分解秸秆均会吸收水分, 不利于秸秆的分解和腐熟<sup>[30]</sup>;(3) 土壤微生物分解秸秆时需要一定量的氮素, 而不施肥进行秸秆还田会导致土壤C/N失衡, 并且微生物与麦苗争夺土壤氮素, 最终引起减产<sup>[31]</sup>。

ISF小麦产量高于ISOM的原因可能为:

(1) 秸秆C/N较高, 有机肥携带碳源进一步增加了秸秆还田区土壤的C/N, 而无机氮肥可以有效降低C/N, 进而促进秸秆腐解, 加速土壤有机氮的矿化, 提高土壤硝态氮含量, 为小麦生长供应速效养分<sup>[32]</sup>;(2) 小麦生长前期温度较低不利于有机肥矿化供氮, 进而影响了小麦分蘖和产量, 与有机肥配施相比, 秸秆深还配施无机氮肥能进一步提高土壤硝态氮含量(表2), 供给小麦吸收;(3) 无机氮肥的施入能够为秸秆腐解微生物提供速效氮素, 进而对秸秆腐解产生激发效应, 有利于秸秆的转化分解。

### 3.5 小麦产量构成因素

小麦单位面积产量由单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重3个因素构成, 生产上这3个因素互为消长, 只有当3个因素乘积最大时才为最佳组合。

小麦产量形成过程中至少存在2个层次，即产量因素对产量形成的直接作用层次和有关营养器官对产量因素形成的间接作用层次，其中穗数对穗粒数和千粒重始终处在主动影响和支配地位，基本苗和单株有效茎蘖数影响穗数<sup>[33]</sup>，本研究表明，在激发式秸秆深还处理下，小麦有效穗数是增加产量的主导因素，而穗粒数和千粒重无显著变化（表3），原因可能为：（1）大田试验中小麦单位面积穗数取决于基本苗、分蘖数和分蘖成穗率。基本苗在播种期决定，分蘖数和成穗率受到水肥条件的制约<sup>[34]</sup>，本试验中每个小区的小麦播种量均严格称重控制，而收获时的有效穗数为小麦增产的主导因素，可见秸秆深还有利于小麦穗数的增加<sup>[35]</sup>；（2）供试品种郑麦9023的高产培育中每公顷穗数可达 $5.25 \times 10^8$ 穗，且试验初期土壤为中低产田，可见在试验初始年份小麦有效穗数有较大的上升空间，至2014年小麦每公顷穗数才接近该品种高产理论穗数的水平，至于小麦有效穗数是否会继续随着试验年限的增加而持续增加，有待于下一步研究的验证。小穗小花分化数和结实率对每穗粒数产生影响，未用氮肥激发和秸秆移除处理的小麦穗粒数减少，可能是由于在中后期氮肥出现亏缺，从而导致小穗小花数退化而引起的。千粒重则受到平均灌浆速率和灌浆持续期的制约，小麦千粒重形成于小麦的灌浆期和乳熟期，是小麦产量的主要构成因素之一，其形成除了受自身生理、生物学规律影响外，还受外界环境的影响，如土壤地力、养分供应等。有机氮肥能够增加小麦千粒重的原因在于有机肥供肥平缓持续，能够提高氮肥的生物固定，使氮素在小麦生育期内持续供应，与化学氮肥的速效性相比，有利于小麦生长后期籽粒灌浆时养分的供应，从而达到提高千粒重的效果。

## 4 结 论

激发式秸秆深还措施在避免常规秸秆覆盖还田影响冬小麦出苗和分蘖的同时，能够显著促进土壤养分的累积和冬小麦产量的增加。本研究表明，有机氮肥对土壤有机质、全氮、微生物生物量碳氮的增加有显著效果，表明有机氮肥对土壤培肥有巨大潜力，而无机氮肥的分解规律与冬小麦的需氮规律较为一致，能极大地促进限制冬小麦产量的主导因素有效穗数的增加，进而达到增产的效果。此外，

由于秸秆腐解和作物生长竞争性消耗土壤氮素，在本试验设置的3个配比梯度（8%、16%和24%）中，16%的无机氮肥激发的秸秆深还方式为黄淮海平原潮土区最佳选择。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 ( 6 ) : 1441—1449  
Zhao S C, Cao C Y, Li K J, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China ( In Chinese ). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20 ( 6 ) : 1441—1449
- [ 2 ] 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响. 作物学报, 2015, 41 ( 1 ) : 160—167  
Chen J, Tang Y H, Yin Y P, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat ( In Chinese ). *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41 ( 1 ) : 160—167
- [ 3 ] Beare M H, Wilson P E, Fraser P M. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release and crop production. *Soil Science Society of American Journal*, 2002, 66: 848—856
- [ 4 ] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响. 中国农业科学, 2012, 45 ( 9 ) : 1741—1749  
Wu J, Guo X S, Lu J W, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 ( 9 ) : 1741—1749
- [ 5 ] 扶明英, 朱利群, 李妍, 等. 秸秆集中深埋对水稻生长及产量的影响. 江苏农业科学, 2013, 41 ( 1 ) : 67—69  
Fu M Y, Zhu L Q, Li Y, et al. Effect of straw concentrated deep buried on rice growth and yield ( In Chinese ). *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41 ( 1 ) : 67—69
- [ 6 ] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征. 土壤学报, 2003, 40 ( 3 ) : 446—453  
Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, et al. Straw carbon decomposition in situ in field and characteristics of soil biomass carbon turnover ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 ( 3 ) : 446—453
- [ 7 ] 吴俊松, 许明敏, 王小华, 等. 水稻秸秆集中沟埋还田

- 对土壤有机质、酶活性及作物产量的影响. 土壤通报, 2015, 46 (1): 203—209
- Wu J S, Xu M M, Wang X H, et al. Effects of ditch-buried rice straw on soil organic matter, enzyme activities and yield (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46 (1): 203—209
- [ 8 ] 李波, 刘建, 熊飞, 等. 稻秆还田深度对盆栽冬小麦结构和生理特性的影响. 麦类作物学报, 2012, 32 (4): 722—727
- Li B, Liu J, Xiong F, et al. Effects of the depth of returning rice straw into field on the structure and physiological characteristics of winter wheat cultured in pot (In Chinese). Journal of Triticeae Crops, 2012, 32 (4): 722—727
- [ 9 ] Bingemann C W, Varner J E, Martin W P. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. Soil Science Society of American Proceedings, 1953, 17: 34—38
- [ 10 ] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 土壤有机碳激发效应研究进展. 土壤, 2006, 38 (4): 359—365
- Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Advances in research on priming effect of soil organic carbon (In Chinese). Soils, 2006, 38 (4): 359—365
- [ 11 ] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响. 土壤学报, 2014, 51 (1): 150—157
- Yang B J, Huang G Q, Qian H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (1): 150—157
- [ 12 ] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响. 土壤学报, 2013, 50 (5): 915—921
- Ma C, Zhou J, Liu M Q, et al. Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang black soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (5): 915—921
- [ 13 ] 胡玮, 李桂花, 任意, 等. 不同碳氮比有机肥组合对低肥力土壤小麦生物量和部分土壤肥力因素的影响. 中国土壤与肥料, 2011 (2): 22—27
- Hu W, Li G H, Ren Y, et al. The effects of combined organic manure in different carbon-to-nitrogen ratio on wheat biomass and soil fertility in low fertility soil (In Chinese). Soil and Fertilizer of China, 2011 (2): 22—27
- [ 14 ] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term maturing and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in North China Plain. Plant Soil, 2009, 314: 67—76
- [ 15 ] Kahlon M S, Lal R, Ann-Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 151—158
- [ 16 ] 崔婷婷, 窦森, 杨轶因, 等. 秸秆深还对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响. 土壤学报, 2014, 51 (4): 718—725
- Cui T T, Dou S, Yang Y N, et al. Effect of deep applied corn stalks on composition of soil humus and structure of humic acid (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (4): 718—725
- [ 17 ] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响. 土壤学报, 2015, 52 (3): 665—672
- Jiao L N, Li Z H, Yin C C, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 665—672
- [ 18 ] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26 (6): 1785—1792
- Zhao Y L, Guo H B, Xue Z W, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (6): 1785—1792
- [ 19 ] 刘骏, 陈荣丽, 陈桂月, 等. 秸秆还田与氮肥、有机肥配施对小麦生长发育和产量的影响. 河南农业科学, 2015, 44 (3): 48—51, 64
- Liu J, Chen R L, Chen G Y, et al. Effects of combined application of nitrogen and organic fertilizer and straw returning on wheat growth and yield (In Chinese). Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44 (3): 48—51, 64
- [ 20 ] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响. 中国农业科学, 2013, 46 (5): 950—960
- Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (5): 950—960
- [ 21 ] 侯化亭, 张丛志, 张佳宝, 等. 不同施肥水平及玉米种植对土壤微生物生物量碳氮的影响. 土壤, 2012, 44 (1): 163—166
- Hou H T, Zhang C Z, Zhang J B, et al. Effects of



- fertilization and maize growing on soil microbial biomass carbon and nitrogen (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (1): 163—166
- [22] 汪张懿, 宗良纲, 褚慧, 等. 有机肥分解及其对土壤有机碳矿化影响的模拟研究. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (1): 36—42  
Wang Z Y, Zong L G, Chu H, et al. A simulation study on decomposition of organic fertilizers and its effects on soil organic carbon mineralization (In Chinese). *Journal of Agriculture Environment Science*, 2013, 32 (1): 36—42
- [23] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2015, 35 (5): 1445—1451  
Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (5): 1445—1451
- [24] 蔡立群, 牛怡, 罗珠珠, 等. 秸秆促腐还田土壤养分及微生物量的动态变化. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (9): 1047—1056  
Cai L Q, Niu Y, Luo Z Z, et al. Dynamic characteristics of soil nutrients and soil microbial biomass of field-returned straws at different decay accretion conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22 (9): 1047—1056
- [25] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (5): 526—535  
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (5): 526—535
- [26] 董亮, 孙泽强, 王学君, 等. 秸秆与氮肥配施对小麦产量及氮素吸收利用的影响. *山东农业科学*, 2014, 46 (8): 78—80  
Dong L, Sun Z Q, Wang X J, et al. Effect of combined use of straw and nitrogen fertilizer on wheat yield and nitrogen utilization (In Chinese). *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46 (8): 78—80
- [27] 苗峰, 赵炳梓, 陈金林. 秸秆还田与施氮量耦合对冬小麦产量和养分吸收的影响. *土壤*, 2012, 44 (3): 395—401  
Miao F, Zhao B Z, Chen J L. Effects of straw-return coupled with nitrogen fertilizer application on winter wheat yield and nutrient absorption (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (3): 395—401
- [28] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (3): 612—619  
Zhang J, Wen X X, Liao Y C, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (3): 612—619
- [29] Wang X B, Wu H J, Dai K, et al. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China. *Field Crops Research*, 2012, 132: 106—116
- [30] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2009, 96 (3): 374—382
- [31] Sharma P, Abrol V, Sharma R K. Impact of tillage and mulch management on economics, energy requirement and crop performance in maize-wheat rotation in rainfed subhumid inceptisols, India. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34 (1): 46—51
- [32] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦—玉米产量的影响. *生态学报*, 2014, 34 (17): 5052—5061  
Li W, Qiao Y Q, Chen H, et al. Effects of combined straw and N application on the physicochemical properties of lime concretion black soil and crop yields (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (17): 5052—5061
- [33] 程顺和, 郭文善, 王龙俊. *中国南方小麦*. 南京: 江苏科学技术出版社, 2012: 62—64  
Cheng S H, Guo W S, Wang L J. *Wheat in South China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2012: 62—64
- [34] Liu Y, Ding Y F, Wang Q S, et al. Effects of nitrogen and 6-Benzylaminopurine on rice tiller bud growth and changes in endogenous hormones and nitrogen. *Crop Science*, 2011, 51 (2): 786—792
- [35] 于淙超, 刘义国, 林琪. 秸秆还田深度对小麦蔗糖转化及产量形成的影响. *中国农学通报*, 2014, 30 (30): 11—14  
Yu C C, Liu Y G, Lin Q. Effect of depth of straw return on sucrose content and yield of wheat (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30 (30): 11—14

## Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield

ZHAO Jinhua<sup>1, 2</sup> ZHANG Congzhi<sup>2</sup> ZHANG Jiabao<sup>1, 2†</sup>

(1 Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, National Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2 State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Currently, crop straw return via mulching is a practice extensively applied in the fluvo-aquic soil zone of the North China Plain, however, the straw returned via mulching is not readily decomposed and hence unable to raise soil fertility and crop yield instantly. Moreover, straw decomposition needs to consume soil N in competition with crop growth, thus making it hard for the two to share the limited N supply harmoniously. A technique of deep burial of straw coupled with application of inorganic or organic nitrogen as primer was presented in this paper, and a continuous four-year (2011—2014) field experiment was conducted to study effects of the technique on soil fertility and wheat yield. The experiment was designed to have 3 treatments in straw returning method, i.e., Treatment NS (No straw returned), Treatment S (Straw returned via mulching, and Treatment IS (straw buried in deep furrows and then covered with crop planted in between the furrows). In addition, Treatment NS consisted of two sub-treatments, Sub-treatment NSF0 (No straw returned and no fertilizer applied) and Sub-treatment NSFR (No straw returned, but fertilizer applied at a common rate); and Treatment IS did of three sub-treatments, Sub-treatment ISFR (Deep burial of straw plus conventional fertilization). Sub-treatment ISF (Deep burial of straw applied with chemical fertilizer as primer) and Sub-treatment ISOM (Deep burial of straw applied with organic manure as primer). And Sub-treatments ISF and ISGM was further divided into three Plots ISF1, ISF2 and ISF3, and Plots ISOM1, ISOM2 and ISOM3, corresponding to the proportion of nitrogen consumed by straw decomposition, 8%, 16% and 24%, respectively. Results show that (1) compared to control (Sub-treatment NSF0), all the treatments, except for Sub-Treatment NSF0 improved soil nutrient contents, especially Sub-Treatments ISF and ISOM. The effect of Sub-Treatments ISF was mainly on content of nitrate-N and the most remarkable in Plot ISF2, increasing the content of nitrate-N by 82.99%, while that of Sub-Treatments ISOM was obvious on almost all the other soil nutrients, and the most remarkable in Plot ISOM2, increasing the content of organic matter, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and total N in the soil by 60.84%, 123.2%, 207.7% and 90.91%, respectively; compared with 2011, 2014 saw sharp drops in all soil nutrients in Sub-treatment NSF0, but rises in all the treatments and sub-treatments, particularly in Sub-treatments ISF and ISOM, which suggests that the new technique may contribute significantly to improvement of soil fertility; (2) improved soil fertility improved the yield of winter wheat, compared with 2011, the yield decreased by 157.7% in Sub-treatment NSF0 in 2014, but increased by 28.91% and 30.83% in Sub-treatments NSFR and ISFR, and the positive effect was especially significant in Sub-treatments ISF and ISOM, particularly in Plot ISF2, where the yield was increased by 36.17%; and (3) among the indices of yield composition of winter wheat, 1000-grain weight and number of grains per spike did not differ much between treatments and the increase in yield was manifested in number of effective spikes; all, except for NSF0 and SF0; the number

of effective spikes increased with the experiment going on, particularly in Plot ISF2, where the number increased by up to 49.96%; In 2014, Sub-treatments ISF and ISOM increased the number of effective spikes of winter wheat by 144.7% ~ 169.1%, and the effect was the most significant in Plot ISF2, as compared to 2012. To sum up the treatment in Plot ISF2 is the most recommendable mode of straw returning for the studied area.

**Key words** Straw deep returning; Priming effect; Soil nutrients; Yield components; Winter wheat

(责任编辑：檀满枝)



CONTENTS

**Reviews and Comments**

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review ..... WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu ( 290 )  
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review ..... WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. ( 303 )

**Insights and Perspectives**

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science ..... CAI Zucong, HUANG Xinqi ( 310 )

**Research Articles**

- Element Migration in S<sub>3</sub> Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication ..... CHU Chunjie, ZHAO Jingbo ( 320 )  
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation ..... LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. ( 330 )  
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared ( VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation ..... LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. ( 340 )  
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm ..... WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. ( 353 )  
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei ..... DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. ( 363 )  
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow ..... MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. ( 373 )  
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area ..... WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. ( 386 )  
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ..... ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang ( 399 )  
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method ..... LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong ( 409 )  
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa ..... GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. ( 419 )  
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size ..... YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. ( 426 )  
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols ..... LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. ( 436 )  
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ..... ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao ( 448 )  
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil ..... KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. ( 455 )  
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region ..... CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. ( 466 )  
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil ..... HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. ( 475 )  
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ..... ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. ( 488 )  
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ..... ZHENG Yan, JIA Zhongjun ( 500 )  
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn ..... MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. ( 508 )  
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator ..... WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. ( 521 )  
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet ..... SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. ( 531 )  
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil ..... KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. ( 542 )

**Research Notes**

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite ..... YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. ( 550 )  
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol ..... MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. ( 559 )

**Cover Picture:** Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation ( by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：卢 萍 檀满枝 陈荣府

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008  
电话：025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717  
电话：010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392163