

不同来源氮素配合施用提高东北春玉米氮素利用与改善土壤肥力的可持续性研究

姜慧敏¹, 郭俊梅², 刘 晓¹, 乔少卿³, 张雪凌⁴, 郭康莉¹, 张建峰^{1*}, 杨俊诚^{1*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3 延安大学生命科学学院, 陕西延安 716000; 4 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要: 【目的】研究不同氮素形态对东北春玉米氮素利用和土壤肥效的影响, 为氮素养分持续高效利用和培肥土壤提供理论依据。【方法】2013~2015 年连续三年在东北典型春玉米种植区开展田间定位试验, 在相同磷钾肥施用前提下, 试验设 4 个处理: 1) 50% 玉米秸秆氮 (N0); 2) 100% 速效氮 165 kg/hm² (N1); 3) 60% 速效氮 + 20% 有机肥氮 + 20% 缓释氮, 施氮量 165 kg/hm² (N2); 4) N2 + 生物炭, 生物炭量相当于 50% 玉米秸秆 (N3)。收获期测定耕层土壤基本理化指标、作物产量及氮素利用率、基肥和追肥后土壤 N₂O 排放量。【结果】1) 三年玉米平均产量 N1、N2 和 N3 处理分别比 N0 处理显著增加了 62.7%、67.7% 和 80.1% ($P < 0.05$); N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增产 3.0% 和 10.7%; N3 处理玉米产量可持续性指数 (SYI) 最高, 产量可持续性最好。2) 与 N1 处理相比, 2013 年和 2014 年累计化肥氮利用率 N2 和 N3 处理分别增加了 8.4% 和 12.7%、10.2% 和 15.5%, 2015 年分别显著增加了 8.4% 和 12.7% ($P < 0.05$)。N2 和 N3 处理累计化肥氮利用率呈现逐年增加的趋势, 且 N3 处理增加幅度大于 N2 处理, 说明 N3 处理氮肥的后效更加明显。3) 施氮处理显著提高了土壤 N₂O 累积排放量 ($P < 0.05$), N3 处理较 N1 处理显著降低了 53.2%; 4) N3 处理的综合土壤肥力指数 (IFI) 最高, N3 处理在农学、土壤肥力和环境效应评价中最优。【结论】在总氮施用量不变的前提下, 以添加适宜比例生物炭、有机肥和缓释氮肥替代部分速效化肥氮, 可协同实现东北春玉米持续稳产、氮素养分持续高效利用和土壤肥力的可持续改善。

关键词: 生物炭; N₂O 排放; 玉米; 氮肥利用效率

Effects of combined application of nitrogen from different source on nitrogen utilization of spring maize and sustainability of soil fertility in Northeast China

JIANG Hui-min¹, GUO Jun-mei², LIU Xiao¹, QIAO Shao-qing³, ZHANG Xue-ling⁴, GUO Kang-li¹,
ZHANG Jian-feng^{1*}, YANG Jun-cheng^{1*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3 School of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an Shaanxi 716000, China; 4 College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: 【Objectives】 This paper focused on sustaining high use of nitrogen (N) and improving soil fertility by applying different N forms in Northeast China. 【Methods】 A 3-year field experiment was conducted in Heilongjiang Province, China during 2013 to 2015. Under the same rates of P and K input, four treatments were designed: 1) only 50% maize straw (N0); 2) 100% chemical N fertilizer (N 165 kg/hm², N1); 3) 80% chemical N fertilizer (60% fast released and 20% slow released N) + 20% organic N fertilizer, as N 165 kg/hm² (N2); and 4) N2 + biochar, with the same amount as 50% maize straw (N3). The plant and soil samples (0–20 cm depth)

收稿日期: 2016-06-23 接受日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41501322, 21577172); 国家重点基础研究发展计划“973”课题 (2013CB127406); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目 (IARRP-2015-21); 国家科技合作专项 (2015DFA20790) 资助。

作者简介: 姜慧敏 (1980—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤培肥与改良研究。

Tel: 010-82105061, E-mail: jianghuimin@caas.cn

* 通信作者 Tel: 010-82106203, E-mail: zhangjianfeng@caas.cn; Tel: 010-82108760, E-mail: yangjuncheng@caas.cn

were collected at the harvest, the related items were analyzed using regular methods. N_2O emission was analyzed after the basic and topdressing fertilization. 【Results】 Compared with the N_0 , the average yields of the N_1 , N_2 and N_3 from 2013 to 2015 were significantly increased by 62.7%, 67.7% and 80.1% ($P < 0.05$), respectively. The average maize yield of three years in the N_1 was 10421 kg/hm^2 which was 3.0% and 10.7% lower than those of the N_2 and N_3 , respectively. The sustainable yield index (*SYI*) in the N_3 was higher than those in other treatments. Compared with N_1 , the cumulative chemical N use efficiencies of the N_2 and N_3 were increased by 8.4% and 12.7% in 2013, by 10.2% and 15.5% in 2014, and significantly increased by 8.4% and 12.7% in 2015 ($P < 0.05$). The cumulative chemical N use efficiencies of the N_2 and N_3 showed increasing trend year after year and the increase in the N_3 was bigger than in the N_2 . The single application of fast release N fertilizer resulted in greater soil N_2O emission. Soil N_2O emission in the N_3 was significantly decreased by 53.2% compared to the N_1 ($P < 0.05$). The integrated fertility indexes (*IFT*) in the N_3 was higher than those in other treatments. 【Conclusions】 The optimum N managements can be coordinated to achieve high maize yield and high N use efficiency in Northeast China by regulating the amount of N fertilizer with adding biochar and substituting chemical fertilizer N with organic fertilizer N and slow release N.

Key words: biochar; N_2O emission; maize; N use efficiency

东北是我国玉米主产区之一, 种植面积和总产量均占到全国的 30% 左右, 对我国粮食安全起着非常重要的作用^[1]。玉米是对氮素敏感且需氮量较多的高产作物, 合理施用氮肥是增加玉米产量、提高氮肥利用率的重要措施。但长期以来, 东北地区氮肥多采用一次性基施, 基本不施缓控释肥, 且为了追求高产而过量施用氮肥的问题十分突出, 直接导致氮肥利用率降低和环境污染风险的增加^[2]。同时, 虽然东北地区有机肥资源丰富, 但资源利用率低, 玉米几乎不施有机肥^[3], 由此逐渐造成土壤物理性质退化, 土壤耕作、保水、保肥性能降低, 使玉米植株吸收氮素养分受阻, 直接影响玉米产量的长期稳定提高^[4]。因此, 科学合理的施肥是保证黑土区春玉米高产、氮肥高效利用、环境生态安全和土壤肥力可持续的重要措施。

关于提高东北春玉米产量、氮素利用率及减少环境风险的施肥方式研究较多, 如长期有机无机配施试验结果表明, 等氮量条件下, 猪粪或秸秆配施化肥氮能显著提高玉米产量及氮肥利用率^[5], 猪粪、牛粪或秸秆与化肥配施能有效提高春玉米农田基础地力产量和基础地力贡献率, 增加有机物料投入是黑土区农田基础地力培育的最佳施肥措施^[6]。但以往有机无机配施多是畜禽粪便有机肥或秸秆与化肥单独配施, 而秸秆和畜禽粪便有机肥与化肥配施的多年定位研究较少。近年来, 秸秆炭化后的生物炭逐渐成为一种新型有机肥, 国内外研究表明, 生物炭与适量的氮肥配施可提高氮肥利用率^[7]、减少 N_2O 气体的排放^[8], 说明生物炭与氮肥之间存在互补或协同

效应, 但这些研究多应用于水田, 且多是室内培养试验, 而在东北春玉米种植区将生物炭、畜禽粪便有机肥、秸秆这三种有机肥与化肥配施的多年田间定位研究鲜有报道。另外, 由于缓释氮肥能够根据作物的需肥规律释放养分, 在东北春玉米上的应用报道也很多^[9], 但等氮量条件下, 速效氮和缓释氮与有机肥(畜禽粪便、秸秆、生物炭)配合施用对氮素养分利用和土壤综合肥力评价研究尚无报道。

基于此, 本研究以东北春玉米典型种植区黑龙江省为研究基地, 采用连续 3 年的田间定位试验, 研究不同氮素形态(速效氮、缓效氮和有机氮)配施生物炭对春玉米产量、氮素利用效率、 N_2O 排放及土壤肥效的影响, 以期为进一步实现氮素养分的持续高效利用和土壤肥力的可持续提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验点位于黑龙江省哈尔滨市民主乡黑龙江省农业科学院现代农业科技示范园区, 东经 $126^\circ 48' 55.64'' \sim 126^\circ 51' 26.50''$, 北纬 $45^\circ 49' 44.33'' \sim 45^\circ 51' 01.60''$, 海拔 $130 \sim 150 \text{ m}$, 属于寒温带大陆季风气候, 年平均气温 3.6°C , 年降水量为 $486.4 \sim 543.6 \text{ mm}$; 高于 10°C 年积温为 $2600 \sim 2800^\circ\text{C}$, 全年无霜期 135 天; 年平均风速 4.1 m/s 。土壤类型为黑土, 质地为砂砾 13%、粉粒 63%、粘粒 24%, 黑土层厚度为 $25 \sim 40 \text{ cm}$, 粘土层厚度为 $30 \sim 35 \text{ m}$ 。试验前供试土壤有机质含量为 28.70 g/kg , 全量氮、磷、钾含量分别为 1.14、

0.39、2.95 g/kg, 速效氮、磷、钾含量分别为 85.19、30.00、185.98 mg/kg, pH 6.85。

1.2 试验设计

试验区种植制度为一年一熟春玉米, 供试作物为当地主栽品种龙单 42 号。试验从 2013 年 5 月开始, 到 2015 年 10 月连续种植了三季春玉米。试验在施用相同磷、钾肥的基础上, 设 4 个处理, 分别为: 1) 50% 玉米秸秆 (N0); 2) 100% 速效氮 165 kg/hm² (N1); 3) 60% 速效氮 + 20% 有机肥氮 + 20% 缓释氮, 共 165 kg/hm² (N2); 4) N2 + 生物炭, 生物炭量相当于 50% 玉米秸秆 (N3)。每个处理重复 4 次, 区组随机排列, 小区面积为 60 m²。

速效氮肥为尿素, 按照基肥、大喇叭口期比例 2 : 1 施入; 缓释氮肥为缓释包膜尿素 (含氮量为 41.8%), 由中国科学院南京土壤研究所提供; 有机肥为商品有机肥 (水分含量 30.1%、有机质 47.8%、N 1.86%、P₂O₅ 3.11%、K₂O 0.85%), 有机肥由江苏田娘农业科技有限公司提供, 替代量参考前期研究结果^[1]; 磷肥为重过磷酸钙; 钾肥为氯化钾; 玉米秸秆平均 N、P₂O₅、K₂O 含量分别 0.70%、0.11% 和 1.42%; 生物炭添加量为 2 t/hm² (相当于 50% 玉米秸秆量)。缓释氮肥、有机肥、磷肥、钾肥玉米秸秆和生物炭均基施, 具体肥料施用量如表 1 所示。

1.3 供试生物炭基本理化性质

生物炭由黑龙江省农业科学院提供, 是由玉米秸秆在 500℃ 厌氧条件下热解而成的高度芳香化产物, 其性质较为稳定, 且含有一定的养分。参照《土壤农化分析》^[10]和《木炭和木炭试验方法》^[11]分析, 其有机碳含量为 77%, 全量氮、磷、钾含量为 6.10、5.17、22.8 g/kg, 阳离子交换量为 9.98 cmol(+)/kg, 灰分含量为 13.3%。

1.4 样品采集与测试

成熟期采集 0—20 cm 耕层土壤样品, 每个小区采 5 个点将土壤混合, 按四分法分取, 风干研磨,

用于土壤基本理化性状指标的测定。成熟期测定植株和籽粒氮素养分含量, 各小区测定玉米产量。

土壤 pH 采用电位法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤全氮采用开氏消煮—半微量滴定法测定; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤有效磷采用 NH₄F—HCl 浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定; 植物样全氮采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮后凯氏定氮法测定^[10]。

土壤 N₂O 气体测定: 2014 年采用静态箱/气相色谱法测定土壤 N₂O 的排放通量^[12]。施基肥及追肥后从第二天起每天采集一次, 连续采集 7 天左右, 随后一周采一次。

温室气体通量计算公式为:

$$F = k \times \frac{V}{A} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{dc}{dt}$$

其中: F 为气体排放通量 [C 或 N mg/(m²·h)]; k 为量纲换算系数; V 为气室体积; A 为底座面积; M 为目标气体摩尔质量; V_0 为标准状况下目标气体的摩尔体积; T_0 为标准状况下绝对气温; T 为箱内温度; P 为箱内气压; P_0 为标准状况下绝对气压; dc/dt 为采样期间箱内温室气体浓度变化速率。

1.5 计算公式

产量可持续性指数 (sustainable yield index, SYI)^[13]:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma_{n-1}) / Y_{\max}$$

其中: $\bar{Y}$ 为平均产量, σ_{n-1} 为标准差, $Y_{\max}$ 为最高产量。

肥料氮利用率 = (收获期施氮区地上部总吸氮量 - 收获期不施氮区地上部总吸氮量) / 肥料氮施用量 × 100%

内梅罗指数法计算土壤综合肥力^[14]:

$$IFI = \sqrt{\frac{(IFI_{i\text{平均}})^2 + (IFI_{i\text{最小}})^2}{2}} \times \left(\frac{n-1}{n}\right)$$

式中: IFI 为土壤综合肥力; $IFI_{i\text{平均}}$ 与 $IFI_{i\text{最小}}$ 分别为

表 1 各处理肥料施用量 (kg/hm²)

Table 1 Amounts of fertilizers applied in the treatments

处理 Treatment	化肥用量 Chemical fertilization			有机肥用量 Organic fertilization			生物炭用量 Biochar input
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
N0	0	60	75	0	0	0	0
N1	165	60	75	0	0	0	0
N2	132	5	60	33	55	15	0
N3	132	5	60	33	55	15	2000

土壤各属性分肥力均值与最小值; n 为评价指标个数。本研究选取 2013~2015 年田间定位试验连续监测的土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 值等 6 个指标作为参评的化学指标, 反映土壤肥力状况。

灰色关联度分析: 本研究对 N0、N1、N2 和 N3 这 4 个处理进行综合评价。首先是评价指标的确定, 2013 年以产量、化肥氮利用率这 2 个指标来评价氮素农学效应, 以土壤全氮、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 这 6 个指标来评价土壤肥力效应; 2014 年在 2013 年评价指标基础上增加了 N_2O 排放量来评价环境效应; 2015 年评价指标与 2013 年评价指标相同。灰色关联度分析参考韦泽秀^[15]。

1.6 数据统计分析

试验结果采用 SAS 9.1 统计分析软件进行方差分析和相关分析, 不同处理间采用最小显著差数法 (LSD 法) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 采用 Excel 和 SigmaPlot 10.0 制图。

2 结果与分析

2.1 产量与氮素利用率

由图 1 可知, 2013 年玉米产量 N1、N2 和 N3 处理分别比 N0 处理显著增产 35.1%、39.7% 和 39.4% ($P < 0.05$); N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增产 3.4% 和 3.2%。2014 年玉米产量 N1、N2 和 N3 处理分别比 N0 处理显著增产 72.6%、75.9% 和 83.2% ($P < 0.05$), 施氮处理增产量比 2013 年相应处理产量提高了 50% 左右; N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增产

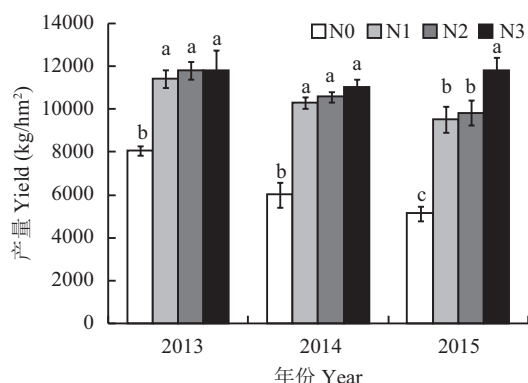


图 1 不同施肥处理对玉米产量的影响

Fig. 1 Effect of different N fertilizer treatments on maize yields

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant difference among different treatments ($P < 0.05$).]

1.9% 和 6.1%。2015 年玉米产量 N1、N2 和 N3 处理分别比 N0 处理显著增产 85.5%、91.4% 和 130.0% ($P < 0.05$); N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增产 3.2% 和 24.0%, 其中 N3 处理显著增产 ($P < 0.05$)。从 3 年的平均产量来看, 施氮处理分别显著增加了 62.7%、67.7% 和 80.1% ($P < 0.05$), 表明氮肥对玉米增产效果显著; N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增产 3.0% 和 10.7%。从 3 年施氮处理产量较对照处理的增产率来看, N3 处理有逐年增加的趋势, 说明氮肥结合有机替代和缓控释及生物炭的施肥方式对玉米持续稳产具有重要作用。N0、N1、N2 和 N3 处理的产量可持续性指数 (SYI) 分别为 0.6、0.8、0.8 和 0.9, N3 处理玉米 SYI 值最高, 说明产量可持续性更好。

农田肥料利用率的计算是建立在试验开始前各小区的土壤肥力均一的基础上进行的, 然而, 连续多季或多年的不同施氮操作已造成处理小区间土壤肥力水平差异悬殊。因此, 利用常规差减法按年度计算多年定位试验的氮肥利用率存在一定的不合理性, 所以, 本文引入累计氮肥利用率的概念和算法^[16], 它是指一段时间内作物累计从土壤中吸收的来自肥料的氮量与累积施入土壤中的肥料氮量的比值, 它可以消除年际间的差异, 时间越长, 肥料利用效率越稳定, 更能准确说明肥料利用的真实情况。本研究计算累计化肥氮利用率。

2013 年玉米当季化学氮肥利用率结果表明 (表 2), N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增加了 8.4% 和 12.7%; 2014 年玉米累计化肥利用率 N2 和 N3 处理分别比 N1 处理增加了 10.2% 和 15.5%; 2015 年玉米累计化肥氮利用率 N2 和 N3 处理比 N1 处理显著增加了 8.4% 和 12.7% ($P < 0.05$)。结果表明, 随着处理时间的延长, N1 处理玉米累计化肥氮利用率呈现先增加后减小的趋势, N2 和 N3 处理呈现逐年增加的趋势, 且 N3 处理增加幅度大于 N2 处理, 说明 N3 处理氮肥的后效更加明显。

2.2 土壤 N_2O 排放

春玉米种植期 N_2O 气体排放规律在不同处理条件下基本一致 (图 2), 排放通量范围在 $-57 \sim 292 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, N0~N3 处理平均排放通量分别为 167、56、50 和 $25 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。施入基肥后一周内各处理 N_2O 的排放通量均较低, 从播种后第 16 天开始, N1 和 N2 处理的 N_2O 排放通量迅速升高, 并在播种后 23 到 44 天之间出现一个明显的排放峰值, 在此时期内, N1 和 N2 处理的 N_2O 最大排放通量分别为 173

和 292 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 而此时期内 N0 和 N3 处理的 N_2O 最大排放通量仅为 43 和 81 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。播种后 44 天以后, 各处理 N_2O 的排放通量逐渐降低, 到 7 月 1 日追肥后 (播种后 62 天) 再次升高, 并出现一个小的排放峰, 在 7 月 6 日达到峰值, 同第一个排放峰的

表 2 不同处理化肥氮的累积吸收量和累计利用率
Table 2 Cumulative chemical N uptakes and use efficiencies of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	吸收量 (kg/hm ²) Uptake	投入量 (kg/hm ²) Input	利用率 (%) NUE
2013	N0	120.0 b	0	
	N1	193.6 a	165	45.0 a
	N2	184.4 a	132	48.8 a
	N3	186.9 a	132	50.7 a
2014	N0	200.7 b	0	
	N1	349.5 a	330	45.1 a
	N2	331.9 a	264	49.7 a
	N3	338.3 a	264	52.1 a
2015	N0	246.0 c	0	
	N1	461.8 a	495	43.6 c
	N2	443.8 b	396	50.0 b
	N3	460.2 a	396	54.1 a

注 (Note): 数值后不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters mean significant difference at 5% level among different treatments.

规律一致, 此时期 N1 和 N2 处理的 N_2O 最大排放通量为 71 和 61 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 而 N3 处理排放通量仅为 5.4 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

施入基肥后一周内 N_2O 的累积排放量由高到低依次为 $\text{N1} > \text{N2} > \text{N3} > \text{N0}$ (表 3)。与 N1 处理相比, N2 和 N3 处理 N_2O 累积排放量分别降低了 4.6% 和 55.8%, 其中 N3 处理差异达显著水平 ($P < 0.05$)。追肥后一周内 N_2O 的累积排放量范围在 9.2~68.8 g/hm^2 , 各处理 N_2O 累积排放量由高到低依次为 $\text{N1} > \text{N2} > \text{N3} > \text{N0}$, 与 N1 处理相比, N2 和 N3 处理 N_2O 累积排放量分别显著降低了 54.5% 和 70.0% ($P < 0.05$)。玉米全生育期内 N_2O 排放总量范围在 420.3~1397.0 g/hm^2 , 由高到低依次为 $\text{N2} > \text{N1} > \text{N3} > \text{N0}$, N3 处理 N_2O 排放总量比 N1 和 N2 处理分别显著降低了 53.2% 和 56.7% ($P < 0.05$)。

2.3 土壤肥力效应

应用修正的内梅罗指数计算了 3 年不同施肥处理下土壤的综合肥力 (图 3), 发现 IFI 值均在 2.0 以下。不同施肥处理 IFI 值由高到低依次为 $\text{N3} > \text{N2} = \text{N1} > \text{N0}$, N0 处理分别较 N1、N2 和 N3 处理显著降低了 5.2%、5.2% 和 11.6% ($P < 0.05$), 施氮处理间 IFI 值没有显著差异。

2.4 灰色关联度分析

由表 4 分析可知, 2013 年 N1、N2 和 N3 处理灰色关联度分别为 0.7533、0.8618 和 0.8535, N2 处理

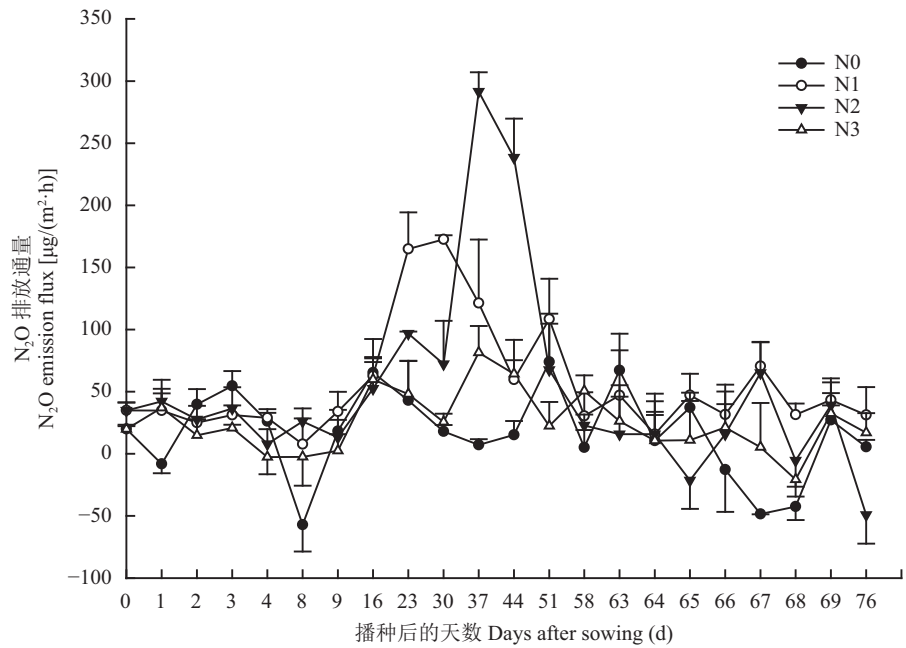


图 2 不同施肥处理对东北春玉米农田 N_2O 排放通量的影响
Fig. 2 Effect of different N fertilizer treatments on N_2O emission flux of spring maize field

表 3 不同处理施肥后 7 天以及玉米整个生育期农田 N₂O 排放量 (g/hm²)

Table 3 Cumulative N₂O emissions in 7 days after fertilization and during the whole growing stage of maize under different treatments

处理 Treatment	基肥后一周 7 days after basal application	追肥后一周 7 days after top dressing	生育期排放总量 Total growing period
N0	19.3 ± 17.1 b	9.2 ± 22.0 c	420.3 ± 101.8 c
N1	45.9 ± 1.7 a	68.8 ± 9.5 a	1292.0 ± 254.1 a
N2	43.8 ± 3.8 a	29.9 ± 3.4 b	1397.0 ± 624.1 a
N3	20.3 ± 1.5 b	20.7 ± 14.3 b	604.3 ± 79.7 b

注 (Note): 以上数值均为平均值 ± 标准误差, 数值后不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) Values are means ± standard error. Values followed by different lowercase letters mean significant difference at 5% level among treatments.

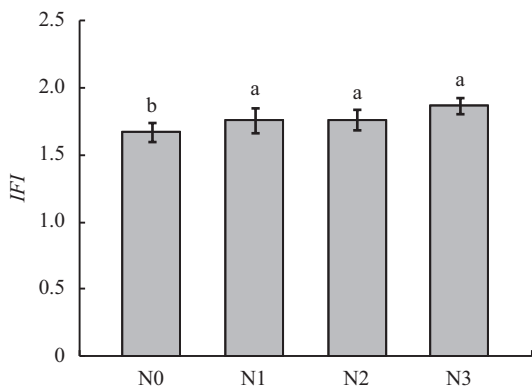


图 3 不同施肥处理下土壤综合肥力指数 (内梅罗指数法)

Fig. 3 IFI under different N fertilizer treatments (Nemoro index method)

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars mean significant difference among different treatments ($P < 0.05$).]

表 4 2013~2015 年不同施肥处理综合评价的关联度及关联序

Table 4 Correlation degrees and rank of comprehensive evaluation of different fertilizer treatments in 2013–2015

年份 Years	处理 Treatment	关联度 Correlation degree	关联序 Correlation rank
2013	N1	0.7533	3
	N2	0.8618	1
	N3	0.8535	2
2014	N1	0.8433	3
	N2	0.8443	2
	N3	0.9981	1
2015	N1	0.7752	3
	N2	0.7886	2
	N3	0.9480	1

在氮素农学效应和土壤肥力综合效应评价中最优, N3 处理与 N2 处理关联度相近, N1 处理关联度值最

小。2014 年 N1、N2 和 N3 处理灰色关联度分别为 0.8433、0.8443 和 0.9981, N3 处理在氮素农学效应、土壤肥力综合效应和环境效应综合评价中最优, N2 和 N1 处理关联度相近。2015 年综合评价结果为 N3 > N2 > N1, 说明 N3 处理在氮素农学效应和土壤肥力综合评价中最优。

3 讨论

3.1 不同氮素形态对春玉米氮素吸收和利用的影响

氮素是影响植物生长发育及产量的重要营养元素。本研究结果表明, 氮素对玉米产量形成起着至关重要的作用, N0 处理 (不施化肥氮, 秸秆还田) 玉米产量显著低于施氮处理, 其原因可能由于氮素不足加速穗叶叶绿素含量下降进程, 使叶片提早衰老^[17], 衰老过快会影响物质转运和光合作用, 最终影响产量的形成^[18]。我们的研究结果证实, 2013 年春玉米抽雄期 SPAD 值含量最高, 其次是灌浆期, 与抽雄期比较, N1、N2 和 N3 处理 SPAD 值灌浆期与之较为接近, 而 N0 处理在灌浆期显著减少 ($P < 0.05$) (数据未列出)。科学合理的氮素施用是春玉米获得高产和提高氮素利用率的重要途径。连续三年定位试验研究发现, 不同形态氮素配施 (N2 和 N3 处理), 作物平均产量较只施化肥氮 (N1 处理) 分别提高了 3.0% 和 10.7%, 其原因可能是: 1) 缓释肥提高了玉米产量构成因素的穗粗和穗长, 2014 年 N2 处理穗长和穗粗分别增加 11.0% 和 2.4%, N3 处理分别增加了 12.9% 和 3.6%^[19], 这与冯爱青等^[20]的研究结果相似。2) 畜禽粪便有机肥和生物炭这些富含碳的有机物施入土壤后, 为土壤微生物提供了大量能源物质, 促进了土壤微生物生物量氮的增加, 2013 年和 2014 年 N2 和 N3 处理土壤微生物量氮分别比 N1 处

理增加 12.5% 和 18.9%、0.7% 和 6.7%^[19],有利于土壤氮的协调供应,从而提高了氮素利用效率。另外,研究结果还发现,N3 处理较 N2 处理玉米产量和累积氮素利用率随着试验时间的延长而出现显著提高,很显然,生物炭添加起到了关键作用,可能有以下三方面原因:一是养分增加,尤其是碳的增加,导致玉米产量显著增加;二是生物炭提高了土壤微生物量碳含量,2013 年和 2014 年 N3 处理土壤微生物量碳含量比 N2 处理分别增加了 13.5% 和 26.9%,其中在 2014 年达到显著水平 ($P < 0.05$)^[21]。有研究表明,土壤微生物量碳与土壤全氮、碱解氮之间均呈显著正相关关系^[22-23],我们前期的研究结果也证实,添加生物炭后土壤微生物量碳与碱解氮之间存在显著正相关关系^[9];三是生物炭中含有大量的钾,增加了土壤中可交换性钾,使产量增加,N3 处理 2013 年和 2014 年土壤速效钾分别比 N2 处理增加了 8.7% 和 6.7%^[21]。

3.2 施肥方式对土壤 N₂O 排放的影响

农田土壤是大气中 N₂O 的最主要释放源,氮肥施用对农田土壤 N₂O 的排放有明显的促进作用^[24],旱作农业生产中氮肥的变化直接影响着土壤 N₂O 排放通量^[25]。本研究结果表明,产生 N₂O 排放的主要因素是施氮肥,不施氮处理 N₂O 的排放量显著低于施氮处理 ($P < 0.05$)。施氮处理 N₂O 累积排放量由高到低依次为 N2 > N1 > N3,N2 处理 N₂O 累积排放量略高于 N1 处理,说明畜禽有机肥的施用为土壤带入大量易溶性有机物,增加了土壤中反硝化细菌的反应底物,且缓释氮肥延长了氮素的释放周期,因而有机替代结合缓释肥对土壤 N₂O 排放的促进作用要高于纯施化肥氮处理。有研究发现,猪粪替代 50% 化肥氮处理 N₂O 累计排放量比化肥氮处理显著提高 119.23%^[26],农田施用有机肥会促进 N₂O 的排放,且对 N₂O 排放的影响明显大于秸秆覆盖、免耕、秸秆深施等农业管理措施^[27],主要是通过调节土壤 C/N 影响土壤微生物活性直接或间接影响 N₂O 排放^[28]。N3 处理由于在 N2 处理基础上添加了生物炭,造成土壤 N₂O 累积排放量显著降低 ($P < 0.05$)。关于生物炭减少 N₂O 排放的报道较多,Spokas 和 Reicosky^[29]对 16 种不同生物炭进行试验表明,15 种生物炭抑制 N₂O 排放。李飞跃和汪建飞^[30]对近年来生物炭对土壤 N₂O 排放的相关文献进行归纳,发现生物炭施入土壤后能够抑制或减少 N₂O 的排放,他们对我国 5 种典型土壤(红壤、黄绵土、黑土、水稻土和潮土)研究表明,350℃ 和 500℃ 制备的生物炭均对黑土土壤 N₂O 排放起到了抑制作用。本研究试

验中的生物炭是在 500℃ 制备,同样也显著降低了土壤 N₂O 的排放。生物炭抑制 N₂O 排放的可能机制有以下两个方面:一是生物炭较高的 C/N 抑制了土壤矿化氮的量,降低了土壤的硝化与反硝化作用^[31];二是生物炭施入土壤后,由于其具备多孔隙的特性,因此能够改善土壤的通气状况,抑制了土壤的反硝化细菌的活性,从而减少了 N₂O 的排放^[32]。

3.3 施肥方式对土壤综合肥力的影响

土壤肥力质量评价是土壤质量评价的核心内容^[33]。评价指标及其权重构成了土壤肥力综合评价指标体系,因物理性质相对稳定和生物性质变化太快等原因常不被选为土壤肥力评价指标,而土壤养分是土壤肥力的核心部分,所以生产中常用氮、磷、钾、有机质等养分来综合衡量土壤肥力高低^[14]。本试验结果表明,3 年土壤综合肥力指数施氮处理间没有显著差异。可见,40% 化肥氮被 20% 有机氮和 20% 缓释氮替代,土壤综合肥力指标相近。有机无机配施能够增加松结态、稳结态、紧结态腐殖质的总量,进而增加了土壤有机质含量^[34]。同时,有机无机配施能够有效提高土壤全磷、无机磷、有机磷含量,改善供磷水平^[35]。N3 处理在 N2 基础上添加了生物炭,土壤综合肥力指数比 N2 提高了 5.9%,说明生物炭添加对土壤综合肥力的提升具有重要作用,可能是生物炭有助于土壤腐殖质的形成,提高土壤有机质含量^[36],还可提高土壤碳氮比,促进土壤微生物的活性,促进土壤有机氮、有机磷的矿化,从而提高了土壤速效氮、磷的含量^[37]。

4 结论

与 N1 处理相比,N3 处理能够有效提高玉米产量,增产率在 1.9%~13.5%,玉米 SYI 值最高,产量可持续性更好;累计氮肥利用率随着时间延长逐渐增加,氮肥后效明显;能够显著降低土壤 N₂O 的排放;土壤综合肥力指数最高;农学、土壤肥力和环境效应综合评价最优。因此,利用化肥氮总量控制、生物炭添加和适量有机和缓释氮肥替代的氮素形态优化配施,可协同实现东北春玉米持续稳产、氮素养分持续高效利用和土壤肥力的可持续。

参 考 文 献:

- [1] 刘占军. 东北春玉米氮磷增施施肥模式研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2010.
Liu Z J. Evaluation on fertilizer application patterns for improving nitrogen and phosphorus use efficiency in spring maize in Northeast China [D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural

- Sciences, 2010.
- [2] 高强, 李德忠, 王娟娟, 等. 春玉米一次性施肥效果研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(4): 125–128.
- Gao Q, Li D Z, Wang J J, *et al.* Effects of single fertilization for spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(4): 125–128.
- [3] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2010, 14: 229–231.
- Gao Q, Feng G Z, Wang Z G. Present situation of fertilizer application on spring maize in Northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 14: 229–231.
- [4] 王丹. 东北地区玉米施肥存在的问题与解决途径[J]. 农业科技通讯, 2013, 7: 201–203.
- Wang D. Present status, problems and strategy on maize fertilization in Northeast China[J]. Agricultural Science and Technology, 2013, 7: 201–203.
- [5] 张秀芝, 高洪军, 彭畅, 等. 等氮量投入下有机无机肥配施对玉米产量及氮素利用的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(6): 123–127.
- Zhang X Z, Gao H J, Peng C, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizer on maize yield and nitrogen utilization under equal nitrogen rates[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(6): 123–127.
- [6] 查燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4649–4659.
- Zha Y, Wu X P, Zhang H M, *et al.* Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4649–4659.
- [7] Saleh M E, Mahmoud A H, Rashad M. Peanut biochar as a stable adsorbent for removing $\text{NH}_4\text{-N}$ from wastewater: a preliminary study[J]. Advances in Environmental Biology, 2012, 6(7): 2170–2176.
- [8] Harter J, Krause H M, Schuetzler S, *et al.* Linking N_2O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community[J]. The ISME Journal, 2013, 8(3): 660–674.
- [9] 韩蔚娟. 新型肥料在黑土上的施用效果及环境效应研究[D]. 吉林: 吉林农业大学硕士学位论文, 2015.
- Han W J. Study on the application effectiveness and environmental effect of new-type fertilizer in the black soil [D]. Jilin: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2015.
- [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, 1999.
- Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [11] GB/T 17664–1999, 木炭和木炭试验方法[S].
- GB/T 17664–1999, Wood charcoal and test method of wood charcoal[S].
- [12] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 不同农业措施下冬小麦田 N_2O 排放通量的特征[J]. 中国农业气象, 2008, 29(2): 130–133.
- Wan Y F, Li Y E, Gao Q Z, *et al.* Characteristics of N_2O flux in winter wheat field under different field management[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(2): 130–133.
- [13] 李忠芳. 长期施肥下我国典型农田作物产量演变特征和机制[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.
- Li Z F. Characteristics and mechanism of grain yield in typical cropland under long-term fertilization in China [D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [14] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197–4204.
- Bao Y X, Xu M G, Lü F T, *et al.* Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(20): 4197–4204.
- [15] 韦泽秀. 水肥对大黄瓜和番茄生理特性及土壤环境的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士论文, 2009.
- Wei Z X. Effect the condition of soil water and fertilizer on the physiological characteristics of plant and soil environments of cucumber and tomato in greenhouse [D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2009.
- [16] 杨宪龙, 路永莉, 李茹, 等. 小麦-玉米轮作体系多年定位试验中作物氮肥利用率计算方法探讨[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3514–3520.
- Yang X L, Lu Y L, Li R, *et al.* Discussion on the calculation method of nitrogen use efficiency in long-term experiments under wheat and maize rotation systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3514–3520.
- [17] 何萍, 金继运, 林葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究[J]. 中国农业科学, 1998, 31(3): 1–4.
- He P, Jin J Y, Lin B. Effect of N application rates on leaf senescence and its mechanism in spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1998, 31(3): 1–4.
- [18] 陈明, 黄庆海, 余喜初等. 肥料运筹对晚稻产量及根系和叶片衰老进程的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(33): 139–143.
- Chen M, Huang Q H, Yu X C, *et al.* Effects of different fertilizer application on the yield and senescence process of root and leaf in late season rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(33): 139–143.
- [19] 郭俊梅. 不同施肥模式对东北春玉米氮素利用与农田温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2015.
- Guo J M. Effect of fertilizer application models on high efficient use of nitrogen and greenhouse gases emission in spring maize in Northeast China. [D] Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [20] 冯爱青, 张民, 路艳艳, 等. 控释氮用量及生物炭对玉米产量及土壤生物化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 159–164.
- Feng A Q, Zhang M, Lu Y Y, *et al.* Effects of controlled release nitrogen application rate and biochar on maize yield and soil biochemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 159–164.
- [21] 郭俊梅. 玉米秸秆炭还田对黑土土壤肥力特性和氮素农学效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 67–75.
- Guo J M. Effect of maize straw derived biochar on the soil fertility and nitrogen agronomic responses in black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 67–75.
- [22] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89–96.

- Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89–96.
- [23] 薛菁芳, 高艳梅, 汪景宽, 等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2): 247–251.
- Xue J F, Gao Y M, Wang J K, *et al.* Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 247–251.
- [24] Qin S P, Wang Y Y, Hu C S, *et al.* Yield-scaled N_2O emissions in a winter wheat-summer corn double-cropping system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 240–244.
- [25] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4 、 N_2O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3655–3661.
- Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, *et al.* Emission characteristics of CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3655–3661.
- [26] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3120–3127.
- Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3120–3127.
- [27] 华璐, 郑海金. 不同有机物料对土壤 N_2O 排放的影响与调控[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(4): 464–468.
- Hua L, Zheng H J. Influence and control of paper waste and plant residual on N_2O emission from soil[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(4): 464–468.
- [28] Fleisher D H, Cavazzoni J, Giacomelli G A, *et al.* Adaptation of SUBSTOR controlled environment potato production with elevated carbon dioxide[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 531–538.
- [29] Spokas K A, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production[J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, 3: 179–193.
- [30] 李飞跃, 汪建飞. 生物炭对土壤 N_2O 排放特征影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2013, 44(4): 1005–1009.
- Li F Y, Wang J F. Effect of biochar addition to soil on N_2O emission: a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4): 1005–1009.
- [31] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, *et al.* Effects of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8): 887–896.
- [32] 王欣欣. 生物炭施用对稻田温室气体排放的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2013.
- Wang X X. Studies on the effect of biochar application on paddy greenhouse gas emissions [D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2013.
- [33] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 137–143.
- Liu S J, Fu B J, Liu G H, *et al.* Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 137–143.
- [34] 接晓辉, 杨丽娟, 周崇峻, 等. 长期施肥对保护地土壤腐殖质总量及各形态之间比值的影响[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 805–808.
- Jie X H, Yang L J, Zhou C J, *et al.* Effect of long-term fertilization on the contents of combined formation of humus in the protected cultivation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 805–808.
- [35] 孙倩倩, 王正银, 赵欢, 等. 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2539–2549.
- Sun Q Q, Wang Z Y, Zhao H, *et al.* Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2539–2549.
- [36] Van Z, Kimber S, Morris S, *et al.* Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327: 235–246.
- [37] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 443–449.