

黒ボク畑におけるリン酸ベースでの家畜ふん堆肥施用がデントコーンの収量および土壌無機態リン酸蓄積に与える影響—施用1年目での評価

伊藤 豊彰¹・小宮山鉄兵¹・三枝 正彦¹

Effect of Phosphorus-based Manure Compost Application on Yield of Dent Corn (*Zea mays* L.) and Soil Inorganic Phosphorus Accumulation in Upland Andisols—First year estimation

Toyoaki ITO, Teppei KOMIYAMA and Masahiko SAIGUSA

キーワード：家畜ふん堆肥，リン酸ベース，デントコーン，収量，土壌可給態リン酸

1. はじめに

環境保全的循環型農業の基本技術として、家畜ふん堆肥の適切な施用法の確立が求められている。家畜ふん堆肥施用により作物の収量・品質の向上が認められている一方、過剰施用による特定養分の土壌蓄積、それに伴う作物の品質の低下¹⁾²⁾や農耕地からの養分流出³⁾が懸念されている。2004年11月には「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が完全施行され、屋内での堆肥製造が義務付けられた。今後は高濃度養分の家畜ふん堆肥の製造が増えることが予想され、その適正な利用法の確立は重要な課題である。

山口・原田⁴⁾がとりまとめた全国の家畜ふん堆肥の成分分析値によると全窒素含量(T-N)の平均値は牛ふん堆肥で1.9%、豚ふん堆肥で3.0%、鶏ふん堆肥で3.2%であるのに対してリン酸含量(P₂O₅)の平均値はそれぞれ2.3%、5.8%、6.5%であり、いずれの畜種においても窒素含量に比べてリン酸含量が高い。一方、作物のリン酸要求量は窒素要求量に比べて少ない⁵⁾。窒素は作物にとって最も重要な要素であるので、作物の窒素要求量を満たすように堆肥施用設計を行うのが一般的と考えられる。その結果、作物が必要とするよりも多くのリン酸が土壌に投入されることとなる。三島ら⁶⁾は環境保全型農業生産と慣行農業生産における農地でのリン酸収支(化学肥料によるインプット量+有機質肥料によるインプット量+堆肥によるインプット量-収穫によるアウトプット量)の比較を行い、多くの作物で慣行農業生産に比べて環境保全型農業生産で過剰に投入されたリン酸が多いことを示した。環境保全型農業では堆肥による養分のインプットが多かったことが慣行農業生産よりも収支過剰となった理由であった。このような堆肥によるリン酸の過剰施用に加えて、我が国の化学肥料リン酸消費量は世界最高水準にあり⁷⁾、土壌リン酸レベルの増加は確実に進行している⁸⁾。土壌に蓄積したリン酸は、斜面に位置することが多いわが国の畑土壌では土壌侵食や表面流去に

より、またリン酸固定力の小さい土壌では溶脱により水系に流出し、富栄養化の危険性を高める。

環境保全的循環型農業の確立のために土壌リン酸蓄積の抑制と作物収量の維持・向上とを同時に満たすような家畜ふん堆肥施用技術が不可欠である。それには従来の窒素の量を基準(窒素ベース)とした堆肥施用に対し、リン酸の量を基準(リン酸ベース)とした堆肥施用(不足窒素分は窒素肥料で補う)が有効であると考えられる。Eghballら⁹⁾はモリソルで窒素ベース、リン酸ベースの肉牛ふん堆肥施用を4年間行い、リン酸ベースでの施用はNベースでの施用と同等のコーン子実収量であり、土壌リン酸レベルの増加を抑制したことを報告している。しかし、使用した堆肥は肉牛ふん堆肥のみであり、また堆肥中のリン酸の可給性評価は実測値に基づいていない。さらに、リン酸固定力が非常に大きい土壌での有効性については全く明らかにされていない。そこで本研究ではリン酸組成が異なる牛ふん堆肥・鶏ふん堆肥の2種類の家畜ふん堆肥を用い、さらに堆肥中のリン酸の可給性(有効態リン酸含量)を室内試験により評価した上でリン酸ベースの堆肥施用量を決定した。試験には日本の畑土壌の半分以上を占めるリン酸固定力の高い黒ボク土壌を用いた。

本研究では黒ボク土における家畜ふん堆肥施用1年目の、リン酸ベースでのデントコーンの収量、養分吸収量、土壌可給態リン酸の蓄積について報告する。

2. 材料と方法

1) 実験計画、栽培概要

圃場試験を東北大学大学院農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター21-1号圃場(典型非アロフェン黒ぼく土)で行った。一区画10m×7mの試験区を設け、以下に示す6処理(3反復)を乱塊法により配置した。処理区は牛ふん堆肥窒素ベース区(牛N区)、牛ふん堆肥リン酸ベース区(牛P区)、鶏ふん堆肥窒素ベース区(鶏N区)、

¹ 東北大学大学院農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター

鶏ふん堆肥リン酸ベース区 (鶏 P 区), 化学肥料区 (化肥区, $N-P_2O_5-K_2O=15-15-15kg/10a$), 無施肥区である。窒素ベース区とは堆肥中の有効態窒素量がデントコーンの標準施肥量である $15kgN/10a$ となるように堆肥を施用した処理区である。牛ふん堆肥の有効態窒素量は全窒素の 30%¹⁰⁾ とし, 鶏ふん堆肥については棚橋ら¹¹⁾ の肥効推定法により全窒素の約 26 ~ 29% と推定されたため牛ふん堆肥に合わせて 30% とした。リン酸ベース区では堆肥中の有効態リン酸量が標準施肥量である $15kg P_2O_5/10a$ となるようにした。有効態リン酸量は水, 重炭酸ナトリウム溶液 (pH8.5) で抽出される堆肥の無機態リン酸量の合計とした。これは, 堆肥中の水 + 重炭酸ナトリウム抽出無機態リン酸の施用量とデントコーンの初期生育におけるリン酸吸収量との間に密接な正の相関がある¹²⁾ ことを根拠にしている。

牛ふん堆肥は当フィールドセンターの発酵施設で製造されたもの, 鶏ふん堆肥は宮城県色麻町 (株) イセファームで製造されたものを用いた。窒素肥料は肥効調節型肥料の LP コート (70 日タイプと 40 日タイプを 2:1 で混合したもの) を用い, リン酸, カリウム肥料はそれぞれ重過リン酸石灰, 塩化カリウムを用いた。家畜ふん堆肥および化学肥料の施用は 2004 年 5 月 13 日に行った。施用後, ロータリー耕で土壤に堆肥・肥料を混ぜ込んだ。5 月 19 日にデントコーン (*Zea mays* L. var *indentata* Sturt) のパイオニア 32K61 (RM122) の種子を機械で一粒播きした。生育調査は草丈, 葉数 (完全展開葉数) を調査した。植物体のサンプリングは台風の影響でデントコーンが倒伏してしまったため 8 月 20 日 (播種後 93 日) に行い, 生育調査を行ってきた各試験区 16 個体を採取し, そのうち平均的な新鮮重を示す 4 個体を採取して乾物重を測定後, 養分分析に供試した。土壤のサンプリングは栽培前と収穫時に各試験区 5 箇所より表層 15cm の土壤を採取した。

2) 作物体, 土壤の分析

作物体の養分吸収量は, 通風乾燥 (72 °C, 2 日間) した

試料を粉碎・微粉碎したものを硫酸 - 過酸化水素分解法で湿式灰化した後, リン酸はモリブデンブルー法で, カリウムは原子吸光法により定量した。窒素は N.C. アナライザー (住化分析センター製 NC-80S) で測定した。

土壤は風乾後, 2mm のふるいを通したものを試料とし, 土壤 pH (土壤:水 =1:2.5), 全炭素, 全窒素, 全リン酸, 全無機態リン酸, 可給態リン酸 (トルオーグ法・オルセン法・ブレイ II 準法), 交換性陽イオン (カリウム・カルシウム・マグネシウム), リン酸吸収係数を測定した。これらの分析法は土壤環境分析法¹³⁾ に準じた方法である。

3) 家畜ふん堆肥の分析

家畜ふん堆肥は風乾後, 粉碎・微粉碎したものを分析に供試した。全窒素, 全炭素含量は N.C. アナライザー (住化分析センター製 NC-80S) で測定した。550 °C で 1 時間灰化した試料を加熱条件下で濃塩酸抽出したものについて, 全リン酸をモリブデンブルー法により, カリウム, カルシウムおよびマグネシウムを原子吸光法によって測定した。

家畜ふん堆肥の有効態リン酸含量を定量するために Frossard ら¹⁴⁾ による逐次抽出法を行った。家畜ふん堆肥を脱塩水, 0.5M 重炭酸ナトリウム溶液 (pH8.5), 0.1M 水酸化ナトリウム溶液, 1.0M 塩酸で順次抽出し, 無機態リン酸をモリブデンブルー法で測定した。

3. 結果と考察

1) 供試土壤の化学性

栽培前の作土 (15cm) の化学性を表 1 に示した。可給態リン酸はトルオーグリン酸で $0.14 (gP_2O_5 kg^{-1})$ であった。地力増進基本指針¹⁵⁾ によるとトルオーグリン酸の改善目標は普通畑において黒ボク土では $0.1 \sim 1.0 (gP_2O_5 kg^{-1})$ とされていることから本試験圃場の可給態リン酸レベルは改善目標の範囲内であるが下限値に近い値であった。塩基組成に関してはカルシウム, マグネシウム, カリウム含有量の当量比で (65 ~ 75) : (20 ~ 25) : (2 ~ 10) が改善目

表 1 栽培前の作土 (15cm) の化学性

pH (H ₂ O)	全炭素 (g kg ⁻¹)	全窒素 (g kg ⁻¹)	可給態リン酸 (gP ₂ O ₅ kg ⁻¹)			リン酸吸収係数 (gP ₂ O ₅ kg ⁻¹)	交換性陽イオン (cmol+kg ⁻¹)		
			トルオーグ法	オルセン法	ブレイ II 準法		交換性 Ca	交換性 Mg	交換性 K
5.9	93.0	5.8	0.14	0.13	0.88	19.6	9.4	2.8	0.92

表 2 供試した堆肥の成分含量

	全炭素 (gkg ⁻¹)	全窒素 (gkg ⁻¹)	炭素率 (C/N)	全リン酸 (gP ₂ O ₅ kg ⁻¹)	カリウム (gK ₂ O kg ⁻¹)	カルシウム (gCaO kg ⁻¹)	マグネシウム (gMgO kg ⁻¹)
牛ふん堆肥	304	27.2	11.2	27.2	62.2	25.8	12.5
鶏ふん堆肥 1	246	29.2	8.4	58.7	49.0	256	17.3
鶏ふん堆肥 2	170	24.3	7.0	61.5	—	—	—

各数値はすべて乾物あたりの値を示す。

鶏ふん堆肥 1 はリン酸ベースで, 鶏ふん堆肥 2 は窒素ベースで用いた。ともに同じ会社の製品だが製造時期が異なるため, 成分含量が異なる。

表3 供試した堆肥の有効態養分含量と全養分含量に占める割合

	窒素		リン酸	
	有効態窒素 (gkg ⁻¹)	全窒素に占める割合 (%)	有効態リン酸 ^{*1} (gP ₂ O ₅ kg ⁻¹)	全リン酸に占める割合 (%)
牛ふん堆肥	8.15	30	20.7	76.1
鶏ふん堆肥 1	8.75	30	20.8	35.4
鶏ふん堆肥 2	7.29	30	23.8	38.7

*1 水 + 重炭酸ナトリウム抽出無機態リン酸

表4 有効態養分の投入量と過剰量および堆肥施用量

処理区		窒素	リン酸	堆肥施用量 (乾物 kg/10a)
		(kg/10a)	(kg/10a)	
牛 N	標準施用量	15.0	15.0	—
	養分投入量	15.0	38.1	1840
	過剰量	0	23.1	
牛 P ^{*2}	養分投入量	6.1	15.6 ^{*1}	750
	過剰量	-8.9	0.6	
	養分投入量	15.0	48.8	2050
鶏 N	養分投入量	15.0	48.8	2050
	過剰量	0	33.8	
	養分投入量	6.3	15.0	720
鶏 P ^{*2}	養分投入量	6.3	15.0	720
	過剰量	-8.7	0	
	養分投入量	15.0	15.0	0
化肥	養分投入量	15.0	15.0	0
	過剰量	0	0	
	養分投入量	0	0	0
無施肥	養分投入量	0	0	0
	過剰量	0	0	
	養分投入量	0	0	0

*1 計算ミスで 0.6kg 余計に投入された

*2 窒素不足分 (マイナス値) は窒素肥料 (緩効性肥料) で補った

標であるのに対して栽培前の圃場の塩基組成は 67:20:13 でありカリウムが多少多い傾向であった。

2) 供試堆肥の性質と施用量の決定, および養分投入量

供試した家畜ふん堆肥の成分組成を表 2 に示した。牛ふん堆肥は以前の報告¹⁶⁾と同様, 全国平均⁴⁾に比べて C/N 比が低い, 養分含量が高い (特にカリウム) といった特徴があった。鶏ふん堆肥についてはカルシウム含量が全国平均⁴⁾を大きく上回った。これは本研究で用いた鶏ふん堆肥は採卵鶏由来のものであったためである。家畜ふん堆肥の有効態リン酸含量 (表 3) は牛ふん堆肥, 鶏ふん堆肥ともに同程度であったが, 全リン酸に占める割合は牛ふん堆肥が高く, 鶏ふん堆肥で低かった。これは鶏ふん堆肥には水や重炭酸ナトリウム溶液で抽出されない画分のリン酸 (難溶性のリン酸カルシウムと考えられる) が多く含まれていたためと推測される。

表 3 の結果をもとに有効態養分の投入量および堆肥施用量を決定した (表 4)。窒素ベース区では過剰の有効態リン酸が土壌に投入され, 標準施用量の 15kgP₂O₅/10a に対して牛 N 区では 38.1, 鶏 N 区では 48.8kgP₂O₅/10a の有効態リン酸が投入された。リン酸ベース区では有効態窒素の投入量

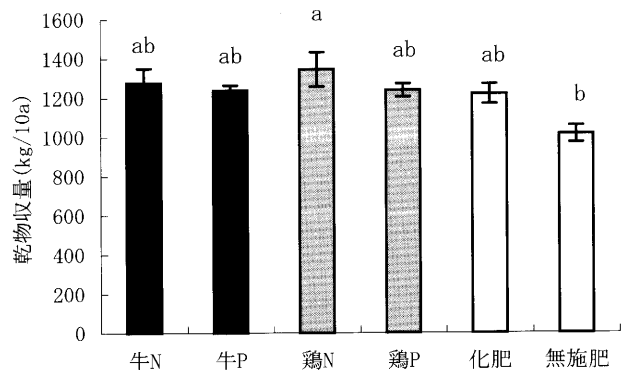


図1 デントコーンの乾物収量 (播種後 93 日)

図中の棒線は標準誤差を, 異なる記号は 5% 水準で有意差がある (Turkey 法, n=3) ことを示す。

が 15kgN/10a に不足したため, 牛 P 区では 8.9, 鶏 P 区では 8.7kgN/10a を窒素肥料で補った。堆肥施用量は牛 N 区, 牛 P 区でそれぞれ 1.84, 0.75 乾物 t/10a (3.32, 1.35 現物 t/10a) となり, 鶏 N 区, 鶏 P 区でそれぞれ 2.05, 0.72 乾物 t/10a (2.58, 0.91 現物 t/10a) となった。いずれの堆肥においてもリン酸ベースでの施用量は窒素ベースでの施用量の半分以下となった。

3) デントコーンの生育・収量

草丈は無施肥区で低く推移し, その他の区では違いは見られなかった。播種後 93 日には牛 N 区, 牛 P 区, 鶏 N 区, 鶏 P 区, 化肥区, 無施肥区でそれぞれ 299, 294, 299, 297, 299, 279cm であった。播種後 93 日における展開葉数は牛 N 区, 牛 P 区, 鶏 N 区, 鶏 P 区, 化肥区, 無施肥区でそれぞれ 19.8, 19.3, 20.1, 19.5, 18.8, 18.1 枚であった。いずれの堆肥区も化肥区よりは展開葉数が多かった。最も多い鶏 N 区と無施肥区との間には 2 枚の差があった。リン酸は幼植物時代に要求量が多く, リン酸の欠乏により葉数の展開が遅れる¹⁷⁾ことが原因である可能性がある。

各処理区における乾物収量を図 1 に示した。井上ら¹⁸⁾が当フィールドセンターで行ったデントコーンの栽培試験での乾物収量は本試験の化肥区とはほぼ同じ施肥体系 (耕起被覆尿素区) で 1370 ~ 1820kg10a⁻¹ (1995 ~ 1998 年) であった。それらの値と比較すると乾物収量は低く, 生育期間が短かったことが原因である。各処理区における乾物収量を比較すると, すべての堆肥施用区で化肥区を上回った。牛

ふん堆肥区では牛N区、牛P区がほぼ同等の収量であり、鶏ふん堆肥区では鶏P区に比べて鶏N区で高い収量であったが、有意差は認められなかった。有意差は鶏N区と無施肥区との間にのみ5%水準(Turkeyの多重比較法)で認められた。以上の結果より、施用初年目においてリン酸ベースでの家畜ふん堆肥の施用は化学肥料区と同等もしくはそれ以上の乾物収量を得ることができ、収量の面から黒ボク土においても有効な施用法と評価される。

4) デントコーンの養分吸収量と乾物生産

デントコーンの窒素およびリン酸吸収量を図2に示した。窒素吸収量は鶏ふん堆肥区で高く、牛ふん堆肥区および化肥区は同程度であった。これより、牛ふん堆肥に関しては無機化率30%という設定は正しかったといえる。鶏ふん堆肥区は窒素吸収量が高い傾向があり、実際には無機化率30%という推定値より高かったと考えられる。

リン酸吸収量は乾物収量と相関が高く、リン酸供給量の違いが乾物生産に影響したと考えられた。リン酸ベース区(牛P区、鶏P区)のリン酸吸収量は化肥区のそれに比べて高く、この要因として家畜ふん堆肥の有効態リン酸がリン酸肥料よりも利用効率が高かった、もしくは家畜ふん堆肥の有効態リン酸以外のリン酸が利用されたことが考えられた。

5) 栽培前後における土壌の可給態リン酸含量の変化

栽培前後における土壌の可給態リン酸(トルオーグリン酸)含量の変化を図3に示した。栽培後土壌の可給態リン酸含量は牛N区、鶏N区で栽培前と比べて有意に増加した。その他の区でも増加は認められたが、有意差はなかった。また、栽培後土壌の値は窒素ベース区、リン酸ベース区いずれにおいても牛ふん堆肥区よりも鶏ふん堆肥区の方が高くなった。この原因として鶏ふん堆肥は有効態リン酸の割合が低いために(35~39%, 表3)、全リン酸としての投

入量が牛ふん堆肥区よりも多かったことが考えられた。本研究の結果は家畜ふん(堆肥)施用土壌において土壌無機態リン酸が増加するという報告^{19) 20)}と一致した。

以上の結果より、堆肥施用初年目の黒ボク畑において、リン酸ベースでの家畜ふん堆肥施用は化学肥料区の乾物収量を上回り、窒素ベース区に比べて土壌可給態リン酸含量の増加を抑制できることが明らかとなった。

4. 要約

環境負荷を軽減するために土壌リン酸蓄積を抑制し、同時に作物収量を維持するための家畜ふん堆肥施用法としてリン酸ベースでの施用を黒ボク土壌において検討した初年目の結果を報告した。家畜ふん堆肥はリン酸の溶解性が異なる牛ふん堆肥と鶏ふん堆肥を用いた。リン酸ベース区におけるデントコーンの乾物収量は化学肥料区を上回った。家畜ふん堆肥の窒素無機化率は牛ふん堆肥区では推定値通り、鶏ふん堆肥区では推定値よりも高かったと考えられた。リン酸ベースで施用された家畜ふん堆肥のリン酸は化学肥料リン酸よりも利用効率が高いと推測された。栽培前後における土壌可給態リン酸含量は窒素ベース区(牛N区、鶏N区)では栽培後土壌で有意に増加したが、リン酸ベース区(牛P区、鶏P区)では有意差は認められなかった。

以上より、家畜ふん堆肥施用1年目においてリン酸ベースでの施用はリン酸固定力の大きい黒ボク畑で、デントコーンの収量を維持し、土壌リン酸蓄積を抑制できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 伊藤豊彰・橋本三尚・井上博道・三枝正彦(2001)川渡農場報告, 17:1-8
- 2) 中津智史・東田修司・山神正弘(2000)日本土壌肥料

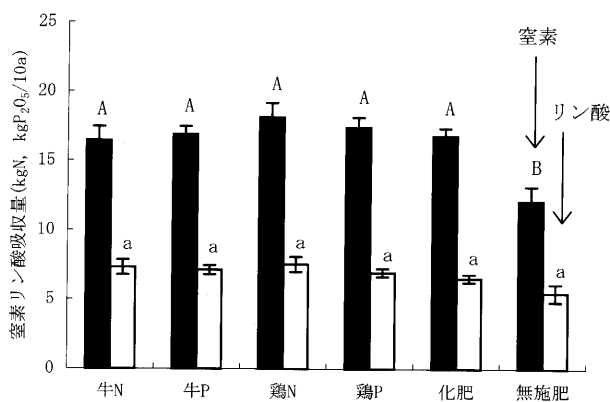


図2 各処理区における窒素、リン酸吸収量

図中の棒線は標準誤差を、異なる記号は5%水準で有意差がある(Turkey法, n=3)ことを示す。

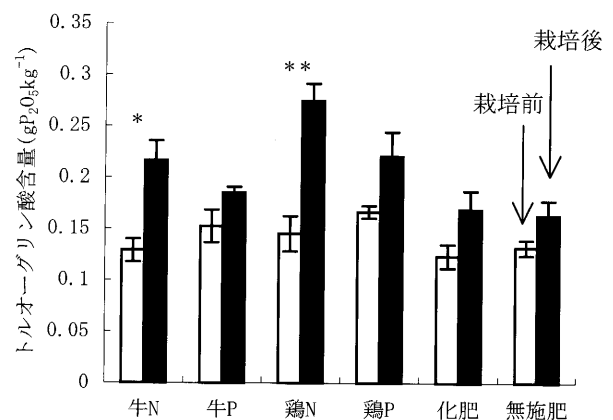


図3 栽培前後における土壌のトルオーグリン酸含量の変化
図中の棒線は標準誤差を示す。

*5%水準で有意差あり, **1%水準で有意差あり(t検定, n=3)

- 学雑誌, 71:97-100
- 3) 西尾道徳 (2005) 環境保全型農業大辞典 1, 農文協 (編), 農文協
 - 4) 山口武則・原田靖生 (1996) 平成8年度家畜ふん尿処理利用研究会資料:15-23
 - 5) 伊藤豊彰 (2005) 畑土壌の作物への養水分供給, 土壌サイエンス入門, 三枝正彦ら, 文永堂出版, P51-62
 - 6) 三島慎一郎・木村龍介 (2004) 農業技術, 59:87-89
 - 7) 西尾道徳 (2002) 日本土壌肥科学雑誌, 73:219-225
 - 8) 小原洋・中井信 (2004) 日本土壌肥科学雑誌, 75:59-67
 - 9) Bahman Eghball and James F. Power (1999) *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 63:895-901
 - 10) 草地試験場 (1983) 草地試験場資料, No.58-2:46-49
 - 11) 棚橋寿彦・矢野秀治 (2004) 日本土壌肥科学雑誌, 75:257-260
 - 12) T. Ito, T. Yokota and M. Saigusa (2004) International Symposium on Organics Recycling (ISOR) in Akita, Japan, Proceedings:261-262
 - 13) 土壌環境分析法編集委員会編 (1997) 土壌環境分析法, 博友社
 - 14) E. Frossard, P. Tekely & J. Y. Grimal (1994) *European Journal of Soil Science.*, 45:403-408
 - 15) 農林水産省 (1997) 地力増進基本指針, 農林水産省ホームページ
 - 16) 伊藤豊彰・二瓶章 (1999) 川渡農場報告 15:27-34
 - 17) 戸澤英男 (1981) トウモロコシの栽培技術, 農文協
 - 18) 井上博道・伊藤豊彰・三枝正彦 (2000) 日本土壌肥科学雑誌, 71:674-681
 - 19) A. N. Sharpley, R. W. McDowell, and P. J. A. Kleinman (2004) *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:2048-2057
 - 20) H. Hirata, K. Watanabe, K. Fukushima, M. Aoki, R. Imamura, and M. Takahashi (1999) *Soil Sci. Plant Nutri.*, 45:577-590