

土壤中 N、P、K 的转换机理

马睿¹, 杨睿¹, 牟晓伟², 蓝青², 林相昊²

1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074

2. 青岛水务集团有限公司, 山东 青岛 266071

DOI:10.61369/WCEST.2025050015

摘 要 : 当今农业生产中使用化学肥料以成为常态, 其主要目的在于补充因种植作物引起的土壤养分的缺失。肥料中以 N、P、K 为主要所需元素, 这三种元素也是作物所需的三种主要营养元素。虽然 N、P、K 在土壤中含量丰富, 但大部分以不可被利用的形态存在于土壤当中, 可被利用的形态含量甚低, 因此导致了连续种植作物后的土壤肥力严重下降。本文阐述了, 三种元素在土壤中的存在形态及其可被利用的存在形式及相互间的转换机理。

关 键 词 : 土壤肥料; 元素形态; 土壤元素转换; 植物营养

Transforming Nitrogen Phosphorus and Potassium Mechanism in Soil

Ma Rui¹, Yang Rui¹, Mu Xiaowei², Lan Qing², Lin Xianghao²

1.China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074

2.Qingdao Water Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071

Abstract : Chemical fertilizers has become the necessities of agricultural production. Chemical fertilizer can complement the lack of nutritional elements due to the agricultural production. Previous studies have confirmed that nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium (K) were the first, second and third essential macronutrient for crops, respectively. But these very deficient used plant growth. Hence, the soil fertility decline when continuous cropping plant. This paper expounds that three kinds of elements existing form in the soil, and the common element is mechanism of interconversion among different forms.

Keywords : fertilizer; elementarform; transformation of soil elements; plant nutrient

引言

土壤养分是植物生长发育不可缺少的物质基础, 原因在于土壤中富含大量的营养元素供植物吸收利用。土壤养分消耗过快以成为许多国家关注的重点^[1,2], 在过去的60年中 N、P、K 三种元素的化学肥料已经大幅度的增加^[3], 主要原因是作物的产出所导致的^[4]。植物生长发育所需的营养元素有很多种, 但已被肯定的必需营养元素只有16种。其中大量元素是 C、H、O、N、P、K, 其中只有 C、H、O 主要来自大气和水, N 来自大气, P 和 K 来自岩石的矿化^[5], 而植物能吸收利用的只有营养元素形态的某些部分, 因此对土壤营养元素形态的研究有助于查明土壤对营养元素的吸附作用, 了解植物从土壤中吸收营养元素的过程以及因土壤条件改变而导致的元素化学形态的转变, 为人们能合理利用肥料和使营养元素向植物能吸收利用的方向转化提供科学的依据。

一、氮的作用及其转换过程

(一) 氮的作用

N 是植物生长发育的必要元素, 是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素^[6,7], 它对陆地生态系统有着重要的调节功能^[8-10], 刘芳^[11]李仁岗等^[12]研究表明: 作物吸收的 N 素中约有 55%~75% 来自土壤中的矿质 N, 土壤中能给植物吸收利用的 N 仅占全 N 的 5% 左右^[13], 因此 N 直接影响土壤的肥力及其作物的生产率^[14,15]。土壤中 N 和 P 的缺失导致土壤肥力下降, 特别是 NO_3^- 的平衡失调导

致的肥力下降。N 是构成蛋白质和氨基酸的主要物质^[16], 植物再通过主动或被动的方式吸收土壤中的 NH_4^+ 和 NO_3^- ^[17]。在当今大多数针对新型农业“精准农业”的研究中都集中在地域性差异、空间性差异和时间位点差异所导致的变化等方面^[18-24], 但对于土壤 N 全方位的研究尚未完成^[25]。

(二) 氮的存在形式和转换过程

土壤中全部的 N 储备称为全 N, 全 N 又可分为碱解 N 和有机大分子 N。碱解 N 可以被植物直接吸收和利用, 而有机大分子的 N 需要通过微生物的分解才能够被植物吸收利用。具体利用途径

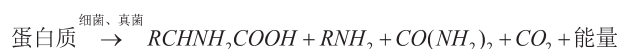
见图1。

碱解N包括物质矿物质形式的 $N(NH_4^+、NO_2^-、NO_3^-)$ 和有机小分子的N(蛋白质、氨基酸、酰胺)，矿物质形式的N可以利用固N细菌将 N_2 转化成 $NH_4^{+[26]}$ 或利用微生物分解有机态的N转化成 NH_3 ，再通过硝化细菌转化为 NO_2^- 和 NO_3^- 被植物直接吸收利用^[27]；有机小分子N的一小部分可以被植物直接利用，大部分通过微生物分解成 NH_4^+ 再通过硝化细菌转化为 NO_2^- 和 NO_3^- 。

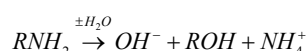
有机大分子N的主要来源是植物的根、茎、叶、土壤环境中的动物及微生物的尸体，微生物将其作为自身的N源^[28]的同是将其转换成小分子的有机N，进一步的分解方式与小分子N的分解转化相同。

土壤中N的主要转化途径如下：

小分子蛋白质首先转化成氨基酸；



氨基酸水解放出氨，形成铵态氮；



铵态氮经亚硝化细菌作用转化成亚硝酸根离子，亚硝态氮对植物有毒，一般不在土壤中积累，很快转化成硝态氮并释放出能量^[29,30]，土壤中的铵态氮在亚硝化和硝化细菌的作用下转化成为硝态氮的过程称为硝化作用。每氧化一个 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 离子要释放 $2H^+$ ，此反应是引起土壤酸化的重要原因。



硝化过程可发生在pH范围较宽的土壤里(4.5~10)，土壤pH值在8.5左右时最适宜硝化过程的进行。硝化细菌需要有足够的钙离子、磷酸二氢根离子供应，以及微量元素之间的平衡才能进行。

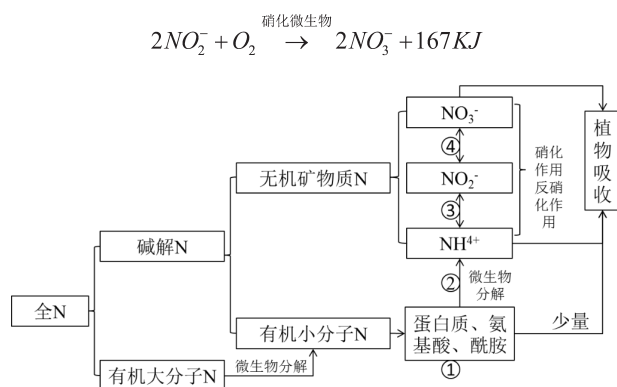


图 1 N 在土壤中的转化

Fig. 1 Transforming nitrogen in the soil

二、磷的作用及其转换过程

（一）磷的作用

P是限制作物生长的第二大主要元素^[31]，由于P可以协同土壤中其它元素对植物生长产生影响^[32]，因此其含量可作为评定植

物生长情况的指标^[33]，。但土壤中的P含量很低^[34]，有研究表明^[27]，土壤全P小于0.08%~0.1%时表明土壤缺少P，中国缺P土壤面积大约 $6.72 \times 10^7 \text{hm}^2$ ，占耕地面积的1/3~1/2^[35]。导致这一问题的主要原因是P可以吸附在土壤颗粒表面或以Ca、Mg、Fe和Al的磷酸盐或氧化物的形式储存在土壤当中^[5,32,36,37]，Ca、Mg、Fe和Al的磷酸盐或氧化物受土壤胶体吸附程度的影响^[38,39]，不能大量的吸附在土壤当中。另有研究表明，P元素的流失与植物茬有关，通过作物轮作，后茬植物与前茬植物种类的不同导致土壤生物种类的数量增多，土壤生物活性增强，并由此导致土壤酸度降低，有毒物质减少，有效养分增加^[40]。

（二）磷的存在形式和转换过程

土壤中的含P物质就其化合物可分为有机P化合物和无机P化合物，大多数土壤中有机P的含量约占土壤总P量的20%~40%，天然植物下土壤的有机P含量时常可占总P量的50%以上^[27]。

土壤中已知的有机P主要有：1、10%~50%肌醇磷酸盐或相当于类糖的磷酸酯、肌醇；2、0.2%~2.5%核酸；3、1%~5%磷脂，以植素、P脂、核酸及少量蛋白质、P糖等形态存在，还有一部分有机P迄今尚未被认识^[13]，有机态的P需要微生物的转化才能变成无机态P，再通过进一步的转化被植物利用如图2。

可以被植物利用的P以无机态的形式所占比重最大，约占土壤总P的75~85%^[13]，分解较慢的含P化合物(中性/碱性土 $Ca_3(PO_4)_2$ 、 $Mg_3(PO_4)_2$ 酸性土壤 $FePO_4$ 、 $AlPO_4$)，仅占可以利用的一小部分。

无机磷可以分为：水溶性磷化合物、弱酸性磷化合物、难溶性磷化合物。三者土壤中的含量依次为，水溶性磷化合物<弱酸性磷化合物<<难溶性磷化合物。水溶性磷化合物和弱酸性磷化合物统称为速效磷，在土壤中水溶性磷化合物下降时弱酸性磷化合物可以给予补充，速效磷是植物可以直接利用的P的主要形式。难溶性磷化合物又称迟效P，不能被植物直接利用。土壤中的全P仅包括速效P和迟效P两部分。

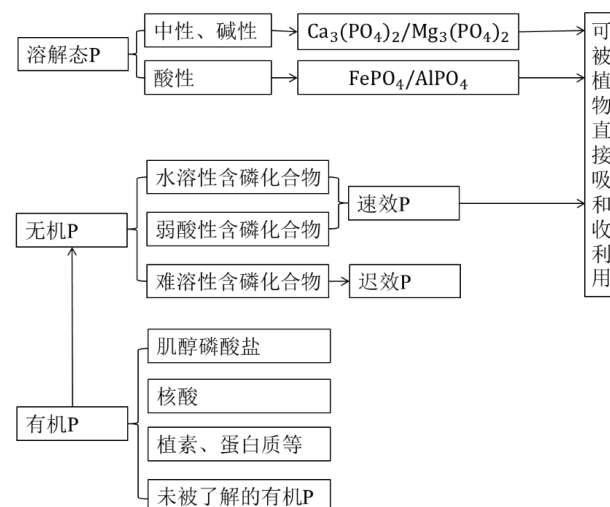


图 2 P 在土壤中的转化

Fig. 2 Transforming phosphorus in the soil

三、钾的作用及其转换过程

（一）钾的作用

K的存在形态、分布规律及其植物有效性是决定其供K能力的重要因素^[42]，K可以保证果实的饱满^[37]，通常K以高浓度的形式存在于植物的韧皮部和分生组织^[17]。K进入土壤当中后会迅速的以离子的形式固定和吸附在土壤当中^[43]，土壤中溶解状态的K受土壤中阳离子浓度、有机质含量、pH、土壤含水量、土壤温度和土壤电解液成分的影响^[44-47]，其中Ca⁺的浓度影响最大^[48]；有机质的含量与K⁺呈负相关性。国外有人在稻田土壤当中发现有机质和H₂O₂可以抑制钾离子吸附到土壤当中^[49]，其主要原因是有机质可以抑制钾离子吸附和扩散到土壤颗粒的表面^[50]。而长期使用含有SO₄⁺离子的肥料可以提高K⁺的吸附性，长期使用含Cl⁻离子的肥料会降低K⁺的吸附性^[51]。

（二）钾的存在形式和转换过程

土壤中K素的存在形态和含量一样，对作物的生长具有重要的制约作用。土壤中K的植物有效性取决于土壤中K的存在形态、分布状况及其转化规律。土壤中K的存在形态和含量受到土壤母质、土壤质地、土壤环境的吸附特性及pH值和土壤中全K量、自然条件等因素的联合控制，使得K在土壤中存在形态复杂且各种存在形态及其含量水平受多种因素影响经常处于动态变化中。

土壤中K主要以三种形式存在，包括无效态K(90~98%)、缓效态K(2~6%)、速效态K(1~2%)^[27]。如图3所示，无效态K是土壤中存在最多的形式，通常在正长石、微斜长石和白云母等原生矿物及伊利石等次生矿物中较多，这些形态的K对植物是相对无效的；缓效态K包括2:1型层状黏土矿物所固定的钾和水云母类似及一部分黑云母中的钾。缓效态K的含量在2~6%，这类K不能被植物迅速吸收，但可以与速效K保持一定的平衡关系，对保K和供K起着调节作用；速效钾是土壤中可以被植物直接吸收和利用的形态，

约占全部K的1~2%，其包括土壤溶液中的K和吸附在土壤胶体表面的代换性K，代换性K占速效K的90%左右，溶液中的K约占10%。三种形态的K的相互转换保证了土壤K素的动态平衡^[13]。

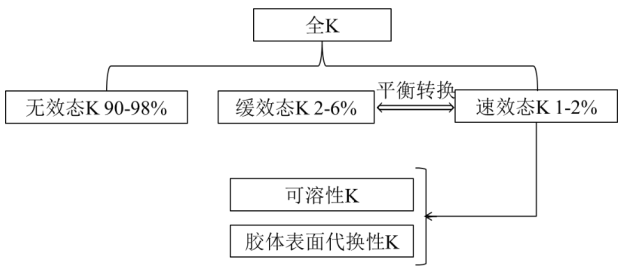


图. 3 K在土壤中的转换

Fig. 3 Transforming phosphorus in the soil

四、结论

土壤中虽然存在大量不同的形式的N、P、K的氧化物、化合物及可溶性的化合物，但能够被植物直接利用的形态有限，在长期农业生产中还会引起养分大的大面积匮乏。由养分匮乏引起的土壤酸化、表层土壤板结、作物减产等问题日趋严重，虽然已经有各种化学肥料、有机肥料作为养分补充的解决办法，但终不能与自然条件下肥沃的土壤相媲美。在土壤这类复杂的环境当中给予作物提供的不仅仅是N、P、K三种元素，诸如Ca、Mg、S、Fe、Mn、Zn、Cu等中微量元素对于作物的缺乏也不容忽视^[52]，另外由于施用化肥和有机肥料导致土壤中的重金属含量日趋加重也对作物生长产生了相当严重的负面影响^[53-55]，在中国的珠江三角洲地区长期种植水稻的土壤中重金属量大于初始阶段的重金属含量^[56]。因此，在解决作物生长的问题时既要研究植物必须的大量元素的供求关系，又要理智的对待土壤其它条件的调节和管理。

参考文献

- [1]Yirga C, Hassan R M. Social costs and incentives for optimal control of soil nutrient depletion in the central highlands of Ethiopia [J]. AGRICULTURAL SYSTEMS, 2010, 103(3):153-160.
- [2]VANDERPOL F, TRAORE B. SOIL NUTRIENT DEPLETION BY AGRICULTURAL PRODUCTION IN SOUTHERN MALI [J]. FERTILIZER RESEARCH, 1993, 36(1):79-90.
- [3]Burt R, Chataway J, Cotter J, et al. Changes in agriculture and food production in North America and Europe [J]. Agriculture at a Crossroads. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development. Island Press, Washington, 2009:20-78.
- [4]Haileslassie A, Priess J, Veldkamp E, et al. Assessment of soil nutrient depletion and its spatial variability on smallholders' mixed farming systems in Ethiopia using partial versus full nutrient balances[J]. AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT, 2005, 108(1):1-16.
- [5]de Castro R C, Benites V D M, Teixeira P C, et al. Phosphorus migration analysis using synchrotron radiation in soil treated with Brazilian granular fertilizers[J]. APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 2015, 105:233-237.
- [6]Clark F E, Roswall T, Others. Terrestrial nitrogen cycles: processes, ecosystem strategies and management impacts. Proceedings of an International Workshop, Osterfarnebo, Sweden, 16-22 September 1979. 1981[C]. Swedish Natural Science Research Council.
- [7]屈明华. 温带森林土壤有效态氮营养生境演变特征 [D]. 东北林业大学, 2005.
- [8]Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. SCIENCE, 2004, 303(5665):1876-1879.
- [9]Cleveland C C, Reed S C, Townsend A R. Nutrient regulation of organic matter decomposition in a tropical rain forest [J]. ECOLOGY, 2006, 87(2):492-503.

- [10] Gundale M J, Metlen K L, Fiedler C E, et al. Nitrogen spatial heterogeneity influences diversity following restoration in a Ponderosa Pine Forest, Montana[J]. ECOLOGICAL APPLICATIONS, 2006, 16(2):479–489.
- [11] 刘芳. 小麦吸收肥料氮和土壤氮的探讨 [J]. 核农学通报, 1994(02):81–84.
- [12] 李仁岗, 王淑敏, 王克武, 等. 冬小麦对土壤氮和肥料氮的吸收及氮素平衡的研究 [J]. 土壤通报, 1982(04):21–22.
- [13] 赵仕花. 不同土地利用下土壤营养元素形态的研究 [D]. 广西师范大学, 2007.
- [14] Chen H, Zhang W, Wang K, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China[J]. JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE, 2012, 92(5S1):1086–1093.
- [15] Zhou L, Song M, Wang S, et al. Patterns of Soil N-15 and Total N and Their Relationships with Environmental Factors on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. PEDOSPHERE, 2014, 24(2):232–242.
- [16] Chun J, Kim S, Arasu M V, et al. Combined effect of Nitrogen, Phosphorus and Potassium fertilizers on the contents of glucosinolates in rocket salad (*Eruca sativa* Mill.)[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015.