

土壤钾素运移的影响因素研究进展^①

占丽平, 李小坤*, 鲁剑巍, 王瑾, 廖志文

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要: 钾是植物必需的营养元素, 土壤中钾素是作物所需钾素的主要来源。土壤中钾素通过质流、扩散和根系截获的方式到达根表被植物吸收。这些运移方式受一定因素的影响。本文简要综述了土壤钾素运移的影响因素, 包括物理因素、化学因素和生物因素, 归纳了土壤水分、质地、体积质量、温度、pH 值、陪伴离子、钾离子的浓度和植物特性等因素对土壤钾素运移的影响, 并展望了未来土壤钾素运移的重点研究方向。

关键词: 土壤钾素运移; 扩散; 物理因素; 化学因素; 生物因素

中图分类号: S153.6

钾是植物生长发育所必需的大量营养元素^[1], 在生长代谢过程中发挥着重要的作用^[2], 土壤钾素的缺乏会造成作物因生理失调而减产^[3]。近年来, 随着吸钾量大的高产作物品种的推广、复种指数的增加和农业集约化程度的提高, 作物从农田中移走的钾量逐渐增加, 土壤钾素输出与投入不平衡加剧, 土壤缺钾面积不断增加, 土壤钾素耗竭日趋严重^[4]。施用钾肥是缓解土壤钾素亏缺的重要途径^[5], 目前我国已成为世界主要的钾肥消费国^[6]。但是, 我国钾肥资源匮乏^[7], 钾肥进口量居世界第一^[8]。在钾肥资源短缺的形势下, 需要高效利用钾素来充分发挥作物的产量潜力和进一步改善产品品质。钾的丰度在地壳所有化学元素中居第七位, 也是岩石圈中第四位最丰富的矿质营养元素^[9]。我国土壤中全钾含量一般在 16.6 g/kg 左右, 高的可达 33.2 g/kg, 但绝大部分钾不能被植物直接吸收利用, 能被植物直接吸收利用的速效性钾含量一般不超过全钾的 2%^[10]。土壤中的钾能否被植物根系所吸收, 不仅与钾的化学形态有关, 也与其所处的空间位置有密切关系。对于整个土体来说, 植物根系平均占土壤容积的百分数约为 3%, 如果仅以根系与土壤直接接触的这部分钾素作为植物的有效养分, 则远远不能满足植物对钾素的需求^[11]。作物需钾总量中只有一小部分存在于根-土界面上, 在当根表的钾被移走后, 非根区的钾通过质流和扩散穿越土壤向根移动将钾补充到根表。土壤中的钾素必须迁移到根表才能被植物吸收利

用, 当钾向根系表面的迁移超过根的吸收时, 钾在根际富集; 而钾向根系表面的迁移不能满足根系吸收的需要时, 在根际形成钾的亏缺区。钾在根际微区内富集或亏缺的程度和区域大小可以反映土壤的供钾特征^[12]。

为了缓解某些局部位土壤钾素持续亏缺的态势, 首先应充分了解土壤中钾素的运移特征及其影响因素, 从而改进钾肥施用技术和提高钾肥利用效率。本文主要从物理、化学和生物学等方面综述了土壤钾素运移的主要影响因素, 以期为土壤钾素资源的高效利用及合理施用钾肥提供理论依据。

1 物理因素

1.1 土壤水分

水分是土壤中最活跃的因子, 是养分是否有效的重要前提, 是土壤养分移动的基质, 它对养分移动性的影响十分明显。土壤水分含量增加, 钾素的扩散速率增加, 直接增加通过扩散方式迁移的钾素含量^[13]。徐进等^[14]研究水分对土壤钾素扩散的影响, 发现土壤钾扩散系数随土壤含水量的增加显著提高。朱咏莉^[15]研究表明在 25℃, 非饱和条件下, 黄土高原 4 种主要农业土壤(塬土、黑垆土、黄绵土、风沙土)钾离子的扩散系数均随土壤含水量的增加而增加。根际钾的动态受土壤含水量的影响, 含水量高于田间持水量时, 近根 1~2 mm 土壤中出现钾的富集, 但当含水量低于

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41001178)、华中农业大学新进博士科研启动专项(2009BQ080)和中央高校基本科研业务费专项资金资助。

* 通讯作者(lixiaokun@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 占丽平(1988—), 女, 湖南石门人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力。E-mail: zhan.li.ping@163.com

田间持水量时, 根际出现钾的亏缺区, 含水量愈低, 亏缺愈严重^[12], 这说明在一定条件下, 增加含水量能相应增加向根表迁移的钾素。

水分通过影响钾素的释放和固定间接影响钾素的迁移量。水分对土壤钾素固定有很大影响, 史建文等^[16]研究表明, 土壤中施入钾肥后, 固钾顺序为干湿交替>恒湿>淹水, 当水分多时矿物膨胀, 晶间钾与溶液间钾可自由交换不易被固定, 因而固钾量少。在稻田淹水情况下, 土壤溶液中有大量的可溶性 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} , 它们能从黏土复合体中取代出交换性钾, 使交换性钾保持在较高的水平^[17-18]。因而淹水后可溶性钾的含量增加, 向根系迁移的钾素含量相应增加。大量研究证实旱作对地力的消耗比水作大, 旱地改水田以及水旱轮作一般能获得增产效果, 有效钾的变化是其中的重要因素之一^[19]。郭建华等^[20]研究表明淹水可以减少土壤对外源钾素的固定, 土壤固定的钾素减少, 为作物提供的有效钾素增加。

1.2 土壤质地

质地类型与其有效养分含量存在显著的相关性^[21]。土壤质地不同会造成其有效养分和理化性状存在差异^[22], 影响土壤中养分的供应状况, 从而影响植物的生长发育。李渤海等^[23]研究表明玉米养分吸收和分配特征受土壤质地的影响, 施肥增加了各种质地土壤上玉米植株及器官中钾的累积量和籽粒产量, 其中砂壤增加幅度最大, 轻壤和中壤次之, 黏壤最小。可见随着土壤砂性的增强, 土壤供应的有效钾素增加。钾的吸附主要发生在小于10 nm 的粒级中, 土壤黏粒部分在速效钾较高时固定钾素^[24]。鲁剑巍等^[25]研究表明, 土壤质地对油菜施钾效果产生明显影响, 在钾肥用量相同的情况下, 质地愈粗施钾效果愈好, 而黏粒含量愈高则施钾效果愈差。

土壤钾素在运移过程中与土壤发生吸持反应, 对其运移产生阻滞作用, 阻滞作用的大小与土壤质地有关。这主要是因为土壤颗粒在表面电场和剩余力场的作用下形成非自由态膜状水, 土壤颗粒愈细, 黏粒含量愈高, 水膜越厚, 膜状水越多, 扩散阻力越大, 吸附解吸阻力越小, 钾运移速率越小。土壤黏粒含量越高, 土壤吸持钾的数量越多, 钾运移阻滞因子 R 与黏粒含量 X 之间的关系可用直线方程表示: $R = 1.20 + 2.123X$, $r = 0.9247^{**}$ 。阻滞因子与各土层黏粒含量呈极显著线性关系^[26]。

1.3 土壤体积质量

土壤体积质量(容重)是指田间状态下单位容积土体的干物质量^[27], 是反映土壤松紧程度的重要指标,

它主要影响养分在土壤中的扩散。性质相似或同类型的土壤, 体积质量不同, 土壤固体颗粒排列不同, 而造成不同的曲折通路, 影响土壤水分的连续性, 而土壤水分连续性是养分扩散的基础; 此外, 体积质量不同, 单位土体内的电荷密度随之改变, 因而改变了养分扩散系数^[28]。已有研究表明扩散是钾离子迁移的主要方式^[29]。当土壤体积质量由 1.0 g/cm^3 增至 1.6 g/cm^3 时, 钾素的扩散系数有所增加^[30], 同时, 土壤体积质量适宜时, 水膜连续性好, 钾素移动性较好。当土壤体积质量增大时, 单位体积土体内的电荷密度增加, 因颗粒靠近, 离子振荡会发生融合, 提高了钾素的扩散系数, 也就提高了土壤供肥量^[31]。钾素向根表的扩散是土壤含水量的函数, 在土壤过于紧实时, 土壤有效含水量降低, 降低钾素的扩散量。临界体积质量(扩散系数随体积质量的增加而达到最大值时的体积质量)受土壤质地、土壤化学性质及土壤水分含量等的影响^[32]。

1.4 土壤温度

土壤温度是影响钾素动态变化和土壤供钾能力的一个重要因素。在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内, 增加温度能使土壤交换性钾离子减少, 并使溶液钾离子浓度相应增加, 从而增加钾素的迁移量^[33]。金继运等^[34]研究表明, 温度可以改变土壤钾素的 Q/I 关系, 温度升高增加了土壤溶液中钾离子的活度, 提高了土壤的供钾能力。在我国北方经常发生早春低温冷害的地区, 温度的影响可能更为明显。王文忠和徐生瑞^[35]研究结果表明当作物生长后期吸钾能力减弱时, 地温升高可以促进土壤缓效钾释放, 使土壤速效钾含量提高, 向根表迁移的钾素含量增加。土壤温度对指导施肥有一定的意义, 在比较寒冷的气候条件下, 尤其是对早播的谷类作物如玉米等, 钾肥条施可能取得更大的肥效。对于多年生豆科作物如苜蓿, 在温度较低时, 需要提高钾肥施用水平, 才能获得一定的产量^[36]。

温度影响土壤中养分的扩散系数, 根据 Stokes-Einstein 公式^[37], 养分离子在水中的扩散系数(D)和温度(T)的关系为: $D = K_B T / 6\pi r_i \eta$ 。钾的扩散系数随温度增加而增加。温度从两方面影响钾素的扩散: 一是温度升高, 水分黏滞度降低, 即钾离子扩散所受的水分阻力减小; 二是温度升高, 粒子运动平均动能增加, 扩散动力增加^[28]。

2 化学因素

2.1 土壤钾离子浓度

在土壤中, 由于带电离子与带电的土壤胶体之间

的相互作用, 钾离子 (K^+) 浓度对钾素运移的影响比较复杂。施用钾肥可提高土壤溶液中钾的浓度, 从而直接增加质流和截获的钾供应量。对扩散方式的钾素迁移来说, 限制其扩散的主要因素是浓度梯度和扩散系数。施肥加大了土体与根表间的钾素浓度差梯度, 增加钾素向根表的扩散迁移量, 通过施钾肥可明显提高其向根表的迁移。扩散系数与养分浓度有关, 其表达式为: $De = D \cdot \theta \cdot f \cdot dC_i / dC_s$, 式中: D 为水溶液中的扩散系数, θ 是土壤的容积含水量, f 是曲折系数或阻抗因数, dC_i / dC_s 是养分离子缓冲力的倒数 ($1/b$), 其中 C_i 为土壤溶液中养分离子浓度, C_s 为土壤中可扩散养分离子的总量, 包括溶液中离子的总量以及能够从土壤固相部分释放出来的养分数量^[32]。由此可见, K^+ 的扩散系数与 K^+ 浓度有关, 由于紧接黏粒表面的水的黏度较黏粒间的自由溶液大, 所以越接近黏粒表面的离子, 其扩散速率越低, 当土壤溶液中 K^+ 浓度较高时, 土壤黏粒表面的 K^+ 占 K^+ 总量的比例较小, 扩散系数增加^[28]。

在膨润土和高岭土中, K^+ 的扩散随着 K^+ 浓度的增加而加快。这主要是由于离子在黏粒表面与黏粒间的不同分布所引起的。由于紧接黏粒表面的水的黏度较黏粒间的自由溶液大, 所以愈接近黏粒表面的离子, 其扩散速度愈低, 在浓度较低时, 黏粒表面的阳离子占阳离子总量的比例较大; 在浓度较高时, 黏粒表面的阳离子占阳离子总量的比例较小, 扩散量增加^[28]。许曼丽和刘芷宇^[38]应用冰冻切片法研究了不同土壤中影响根际微区土壤中钾素富集与亏缺的条件, 发现在土壤供应容积大的情况下钾素有向近根土壤富集的现象, 距根 1 mm 土壤中 K^+ 浓度大于距根 3 mm 的土壤, 土壤速效钾含量高, 富集现象就愈明显。增施钾肥显著增加了钾素向近根土壤的富集量。但是在土壤供应容积小的情况下, 根际微区内出现钾亏缺区, 亏缺区的大小和亏缺程度因土而异。

2.2 土壤 pH 和陪伴离子状况

土壤 pH 影响离子形态和数量, 它主要通过影响钾素的固定和释放、吸附和解吸来影响土壤溶液中钾素浓度, 进而影响钾素迁移。钾的固定量一般随土壤 pH 的升高而增加, 运移的钾素就相应减少。pH 升高, 土壤固钾能力提高, 因为在 $pH > 5.5$ 时, Al^{3+} 以羟基聚合阳离子沉淀, 随 pH 增加, 羟基聚合物的 $-OH$ 数量增多, 可降低钾固定的 $Al(OH)_x$ 的数量的减少, 直至转变成类似三水铝石的形态^[20]。酸性土的平均钾吸附量明显低于中性土, 原因是由于土壤 pH 影响离子选择性, 在 $pH < 5.5$ 时, Al^{3+} 和 $Al(OH)_x$ 占优势^[39-40],

与钾竞争吸附位点, 使溶液中的钾不易被土壤吸附。

另外, 土壤 pH 不同, 陪伴离子不同^[27], 在酸性条件下, 土壤胶体所带的负电荷少, 陪补离子以 H^+ 、 Al^{3+} 为主, 与 K^+ 竞争吸附位点, 抑制了对钾的固定; 钾的固定量少, 质流和扩散的钾素量就高; 在中性条件下, 陪补离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, K^+ 代换 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 比代换 H^+ 、 Al^{3+} 容易, 钾的固定量增加, 运移的钾素量减少; 在碱性条件下, 陪补离子以 Na^+ 为主, K^+ 代换 Na^+ 更加容易, 运移的钾素量减少。当酸性土壤施用石灰后, 石灰中和了交换性铝, 铝离子失去了电荷, 晶层间隙扩大, 并由 Ca^{2+} 占据了原来 Al^{3+} 的位置, 而 Ca^{2+} 较易被 K^+ 置换, 于是 K^+ 就较容易进入这些孔隙将 Ca^{2+} 代换出来而被固定^[41]。

3 生物因素

植物特性, 如生长率、对养分的需求量、根系的生长、根的表面积和根系密度等, 均为影响钾向根系扩散的重要因素。植物特性影响养分的根表浓度, 对主要依靠扩散迁移到根表的养分有效性具有决定性的影响, 特别是对于钾素^[42]。植物单位根长的养分净吸收速率是描述植物根系吸收养分能力大小的一个重要参数。它不仅反映了通过植物根表面养分入流情况, 而且反映根系边围土壤的养分运动状况^[43]。李小坤等^[42]研究表明, 土壤中钾的浓度梯度产生是作物生长本身引起的, 轮作前季 (油菜季) 前期, 油菜生长量小, 从土壤中吸收的钾不多, 根区水溶钾和交换钾首先出现相对亏缺, 随着油菜的生长及对钾的需求量的增加, 根区水溶钾浓度越来越低, 与非根区形成一定浓度梯度, 导致非根区水溶钾向根区扩散。

相对于植物冠层, 植物根系统的大小是反映植物对钾素吸收的一个重要指标。如果单位根的入流速率降低, 相对于植物冠层, 根系的生长就大大加快, 来满足植物冠层的养分。根毛数量较多的植物, 根-土界面的钾浓度较高, 但钾耗竭的区域较大, 它能吸收离根表面较远土壤中的钾, 由于根毛对钾的吸收, 导致土壤钾向根系表面的扩散作用较强^[32]。近年来, 国外许多学者针对土壤菌根对养分的吸收方面做了许多工作, 但有关菌根对土壤养分迁移的影响则报道的不多, 这也是今后研究土壤养分迁移、转化和吸收机理的一个新领域^[44]。

除了上述几方面的因素外, 土壤有机质^[45]和土壤的氧化还原条件^[28]等等, 凡能改变土壤与钾离子间的相互作用以及能改变土壤钾浓度的所有因素, 都对其运移有影响。土壤是一个动态而又复杂的系统, 这些

因素的相互作用也会影响钾素迁移, 如水分和温度的相互作用, 土壤钾素的运移是在相互制约的水热体系中进行的, 水分对土壤钾素运移的效应, 是在一定温度条件下发挥的, 温度对土壤钾素的运移的效应也是在一定水分条件下实现的, 即土壤钾素运移实际上是在水热因子耦合作用影响下进行的。土壤中热量的差异和改变引起水分的迁移, 特别是水汽的扩散, 同时, 土壤水分通过改变土壤热特性来影响土壤温度, 由于温度是影响水分运动不可忽视的因素, 对土壤水分状况也有多方面的影响, 如土温升高时土壤中水的黏滞度和表面张力下降, 土壤水的渗透系数随之增加等^[36]。Barber 和 Burns^[46]用整株根系进行的试验结果表明, 当温度提高时促进水分利用率增加, 从而可能影响某些离子的吸收。另外水热间的相互作用对钾由土体向根表的扩散影响很大, 因而水热耦合作用对土壤钾的扩散过程必然产生影响。

4 土壤钾素运移的调控

调控土壤钾素运移需要依靠科学的钾肥施用技术, 需要防止钾素流失, 从而提高钾素利用率。灌溉、排水与施肥合理配合, 通过建立土壤水-热-钾素联合模型, 揭示一定施钾量和不同灌水条件下土壤钾淋洗渗漏规律, 减少钾素损失^[47]。合理排水, 减少钾素的径流损失。合理施肥, 分析土壤中钾素组成和作物对钾素的需求, 结合钾素运移特点进行平衡施肥。结合测土配方施肥和农田地力培肥工程, 提高土壤钾素供应能力, 高效施肥^[48]。改良土壤及其环境条件, 促进作物根系深扎, 改善作物根系对钾素的吸收。采用优良的肥料结构、施肥制度、施肥技术等调控土壤-植物系统中钾素的转化、运移及其相互关系^[47]。

5 问题与展望

如上所述, 土壤水分、质地、体积质量、温度、pH 值和陪伴离子、 K^+ 的浓度和植物特性等因素对土壤钾的运移产生影响, 从而对钾的植物有效性产生影响。反过来钾的植物有效性又反映出土壤钾的供应状况。然而钾素的有效性取决于各种形态钾之间的动力学以及钾素的运移过程。对于土壤钾素的运移已经有很多研究, 但是主要集中在土壤剖面上的淋溶迁移^[49-51], 对于钾素向根表迁移的报道较少, 尤其是各因素对钾素运移的影响机理方面还存在着许多需要明确和解决的问题, 这都有待进一步研究。而且目前的研究多注重钾的数量或形态的变化, 很少涉及钾素运移的能量变化, 今后应该加强钾素运移能量变化规律及

能量特征的研究以及运移因素之间相互作用与运移定量关系的研究。通过建立钾素运移模型, 更好地预测钾在土壤中的行为, 从而高效利用土壤钾素资源和提高钾肥利用率。随着人口增加造成的农业资源需求增加和高产优质高效农业的发展, 未来应加强钾素在作物-土壤体系内的循环等一系列问题的研究, 摸清不同土壤的供钾能力及钾肥与其他肥料配合施用的有效施用条件, 完善化肥的分配、管理体制, 最大限度地减少钾肥损失, 提高利用率和经济效益, 使有限的资源发挥最大可能的经济效益。

参考文献:

- [1] Singh B, Singh Y, Imas P, Xie J. Potassium nutrition of the rice-wheat cropping system. *Advances in Agronomy*, 2004, 81: 203-258
- [2] Ashley MK, Grant M, Grabov A. Plant responses to potassium deficiencies: A role for potassium transport proteins. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(2): 425-436
- [3] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 宋光煜, 曹叔尤. 钾离子在土壤中吸附和解吸动力学研究进展. *生态环境*, 2003, 12(1): 115-118
- [4] 王亚艺. 水稻-油菜轮作中钾肥效应及作物-土壤体系钾素动态变化研究(硕士学位论文). 武汉: 华中农业大学, 2010
- [5] 王亚艺, 鲁剑巍, 肖荣英, 李小坤. 湖北省两个生态区水稻施钾效果及农田钾素平衡研究. *土壤*, 2010, 42(3): 473-478
- [6] 孙爱文, 张卫峰, 杜芬, 高利伟, 张福锁, 陈新平. 中国钾资源及钾肥发展战略. *现代化工*, 2009, 29(9): 10-14
- [7] 郑诗樟, 胡红青, 庄光泉. 施用不同钾肥对土壤钾的转化和植物钾有效性影响机理的研究进展 // 李保国, 张福锁. 中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. *土壤科学与农业可持续发展(上)*. 北京: 中国农业大学, 2008: 309-316
- [8] 钱伯章. 10年内我国将成为钾肥净出口国. *化肥工业*, 2009, 36(6): 45
- [9] Schroeder D. Structure and weathering of potassium containing minerals. *Proc Congress International Potash Institute*, 1978, 11: 43-63
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [11] Scott JT, Condron LM. Dynamics and availability of phosphorus in the rhizosphere of a temperate silvopastoral system. *Biology Fertility of Soils*, 2003, 39: 65-73
- [12] 金继运. 土壤钾素研究进展. *土壤学报*, 1993, 30(1): 94-101
- [13] Kuckebuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium availability in relation to soil moisture II. Calculations by means of a

- mathematical simulation model. *Plant and Soil*, 1986, 95(2): 233-243
- [14] 徐进, 余劲炎, 赵渭生. 土壤物理因素影响钾素转化和扩散的初步研究. *浙江农业大学学报*, 1989, 15(4): 396-402
- [15] 朱咏莉. 黄土高原地区土壤水分变化过程与强度对养分有效性的影响 (硕士学位论文). 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2002
- [16] 史建文, 鲍士旦, 史瑞和. 耗竭条件下层间钾的释放及耗竭后土壤的固钾特性. *土壤学报*, 1994, 31(1): 42-48
- [17] Dobermann A, Cassman KG, Stacruz PC, Adviento MA, Pampolino MF. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient supplying power in intensive, irrigated rice systems. II. Effective soil K-supplying capacity. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 1996, 46(1): 11-21
- [18] Dobermann A, Stacruz PC, Cassman KG. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 1996, 46(1): 1-10
- [19] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展. *华中农业大学学报*, 2007, 26(6): 907-913
- [20] 郭建华, 韩宝文, 邢竹. 耗竭土壤钾素的固定及对棉花钾素营养的作用. *华北农学报*, 2003, 18(1): 94-96
- [21] 姚军, 张有山. 土壤质地类型与其基础肥力相关性. *北京农业科学*, 1998, 16(4): 33-341
- [22] 介晓磊, 韩燕来, 谭金芳, 郭天财, 王化岑, 崔金梅, 李九星. 不同肥力和土壤质地条件下麦田氮肥利用率的研究. *作物学报*, 1998, 24(6): 884-888
- [23] 李潮海, 王群, 梅沛沛, 刘松涛, 张永恩, 郝四平. 不同质地土壤上玉米养分吸收和分配特征. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 561-568
- [24] 全国土壤普查办公室. *中国土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [25] 鲁剑巍, 陈防, 刘冬碧, 万运帆, 曹一平. 成土母质及土壤质地对油菜施钾效果的影响. *湖北农业科学*, 2001(6): 42-43
- [26] 冯建, 赵玉安, 丁晋丽. 壤土和黑土不同层次钾迁移研究. *甘肃农业科技*, 2006(12): 6-8
- [27] 黄昌勇. *土壤学*. 北京: 中国农业出版社, 1999: 67, 163-171
- [28] 徐明岗, 张一平. 土壤养分扩散的影响因素及其相互关系. *土壤学进展*, 1995, 23(3): 13-20
- [29] 杜振宇, 周健民. 钾在红壤肥际微域中的迁移. *土壤学报*, 2005, 42(6): 1 035-1 039
- [30] Ghildyal BP. Effect of compaction and puddling on soil physical and rice growth. *Soil and Rice*, 1977: 318-336
- [31] 宋家祥, 刘世平, 沈新平, 陈后庆, 庄恒扬, 殷士学, 陆建飞. 土壤紧实度对棉花吸肥的影响. *江苏农学院学报*, 1997, 18(3): 21-26
- [32] 张富仓. 土壤-根系统养分迁移机制及其数值模拟 (硕士学位论文). 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2001
- [33] Sparks DL, Liebhardt WC. Temperature effects on potassium exchange and selectivity in Delaware soils. *Soil Science*, 1982, 133: 10-17
- [34] 金继运, 高广领, 王泽良, 张乃凤. 温度对土壤钾素容量和强度(Q/I)关系的影响. *土壤学报*, 1992, 29(2): 137-141
- [35] 王文忠, 徐生瑞. 施钾对两种土壤钾素动态变化影响的研究. *土壤通报*, 2001, 32(3): 120-122
- [36] 尉芹. 土壤钾转化、烟株钾吸收及烟碱累积的水热耦合效应与特征参数研究 (博士学位论文). 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2004
- [37] Nye PH, Tinker PB. *Solute Movement in the Soil-root System*. Oxford: University of California Press, 1977
- [38] 许曼丽, 刘芷宇. 土壤-根系微区养分状况的研究 II 钾离子的富集与亏缺. *土壤学报*, 1983, 20(3): 295-302
- [39] Thomas GW. Forms of Aluminum in Cation Exchangers: Transactions of the 7th Internal Congress of Soil Science. Madison, Wisconsin: American Statistical Association Publishing centre, 1960, 2: 364-369
- [40] Coleman NT, Harward ME. The heats of neutralization of acid clays and cation-exchange resins. *Journal of the American Chemical Society*, 1953, 75: 6 045-6 046
- [41] 李小坤. 水旱轮作条件下根区与非根区土壤钾素变化及固定释放特性研究 (博士学位论文). 武汉: 华中农业大学, 2009
- [42] 李小坤, 鲁剑巍, 吴礼树, 陈防, 丛日环, 廖志文, 姜存仓. 油菜-水稻轮作下根区与非根区红壤性水稻土钾素变化研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 508-514
- [43] Jungk AO. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. *Plant Roots-The Hidden Half*, 2002: 587-616
- [44] Barber SA. *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc. 1995
- [45] 凌云霄. 影响水稻土磷素扩散的某些因素. *土壤学报*, 1981, 18(2): 194-198
- [46] Barber SA, Burns AF. The effect of temperature and moisture on exchangeable potassium. *Soil Science Society of American Journal*. 1961, 25(5): 349-352
- [47] 李学垣. *土壤化学*. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [48] 王利, 陈防, 王开元. 植物钾效率及其评价的研究进展与展望. *土壤*, 2010, 42(2): 164-170
- [49] 王代长. 酸化土壤中养分离子的淋失机理及金属离子的反应动力学 (博士学位论文). 武汉: 华中农业大学, 2003

- [50] 鲁如坤, 时正元, 赖庆旺. 红壤长期施肥养分下移特征. 土壤, 2000, 22(1): 27-29
- [51] 张长保, 王全九, 樊军, 李世清. 模拟降雨下 PAM 对砂黄土养分迁移影响实验研究. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 82-85

Research Advances on Influence Factors of Soil Potassium Movement

ZHAN Li-ping, LI Xiao-kun, LU Jian-wei, WANG Jin, LIAO Zhi-wen

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Potassium (K) is an essential mineral element for plant. K in soil is the main source for plant growth, and it is taken up by plant through mass flow, diffusion and root interception. The different K transference mode are affected by many factors. In this paper we reviewed the factors which affect the movement of K in soil, including physical, chemical and biological factors, summarized the effects of soil moisture, texture, bulk densities, temperature, pH, accompany ions, K concentration and plant characteristics on the movement of K in soil. Finally, we prospected the focus research on the movement of K in soil.

Key words: Movement of potassium in soil, Diffusion, Physical factors, Chemical factors, Biological factors