

不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量 和水分利用率的影响*

何园球^{1,2} 沈其荣¹ 王兴祥² 李志明²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 通过温室盆栽试验研究了土壤水分和磷素对旱作水稻的耗水量和水分利用率的影响。研究表明: 土壤水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率有极显著的影响, 且相互间的交互作用明显。旱作水稻(包括种子)的耗水量均以中水到高水和中磷到高磷时最高, 耗水量在生长前期占全生育期的 15%~18%, 生长中期占 63%~68%, 生长后期占 16%~20%。水分利用率在苗期($1.25\sim 1.60\text{ g L}^{-1}$), 以低水到中水和低磷到中磷时最高; 中期($2.22\sim 3.56\text{ g L}^{-1}$)到后期($1.68\sim 2.08\text{ g L}^{-1}$), 以低水到中水和中磷到高磷时最高; 不同生长阶段的耗水量和水分利用率均以生长中期 > 后期 > 前期。上述结果将为中国南方丘岗地区水稻旱作的水分和磷素管理提供理论依据。

关键词 水分, 磷素, 旱作水稻, 水分利用率

中图分类号 S152.7

水分和养分是作物生长的主要限制因子, 也是土壤环境的重要调节因素。我国红壤地区雨热同季, 为水稻生长提供了得天独厚的气候条件。但由于降雨分布不均, 7~10 月降雨很少, 季节性干旱非常严重, 这种季节性水分缺乏, 一方面造成作物的生理性缺水而影响作物的发育, 同时很难使被络合的磷酸根离子释放出来, 而造成土壤缺磷, 使作物根系生长受到严重影响, 从而限制作物对土壤水分和养分的吸收, 降低水分和养分的利用率, 影响作物的产量和质量^[1]; 此外, 我国南方地区以岗地和低山丘陵为主, 平地较少, 一些高粮田和水源不充足的地方进行常规淹水种稻十分困难, 同时, 从长远来说, 南方缺水的压力依然存在。近年来采用土壤表层秸秆覆盖进行水稻旱作能获得几乎与传统水稻水作差不多的产量, 而能节水 60%~100%^[2-4]。因此, 探讨在节水灌溉条件下使作物获得较高产量的土壤水分和磷素管理方法和措施, 可为非水网而夏季雨水量又较多的南方丘陵地区种植水稻提供理论依据和技术措施。

1 材料和方法

1.1 供试土壤和品种

土壤采自中国科学院红壤生态实验站(北纬 $28^{\circ}15'20''$, 东经 $116^{\circ}55'30''$), 为第四纪红粘土发育的栽种 15 年水稻后形成的轻度水稻土。水稻品种为当地高产优质的赣优 2 号, 实验在中国科学院南京土壤研究所温室进行, 于 2001 年 5 月 10 日播种。

1.2 实验设计

实验分为三部分(苗期 30 d, 苗期 60 d 和全生育期 164 d)。苗期实验采用小钵(直径 20 cm, 深 30 cm), 每钵装土 2.5 kg; 全生育期实验采用大钵(直径 30 cm, 深 40 cm), 每钵装土 7.0 kg; 小钵每钵播种 3 穴, 大钵播种 4 穴, 每穴两粒种子, 水稻生长到两片叶时每穴只保留一株幼苗, 播种后均用稻草覆盖表土, 以尽量减少水分蒸发。每处理均为 3 次重复, 并设一组无作物处理为对照, 以确定每天的蒸发量。

* 国家自然科学基金项目(30070446)和中国科学院知识创新项目(KZCX2-407, KZCX2-413)部分资助

收稿日期: 2003-04-05; 收到修改稿日期: 2003-06-30

施磷量设 P 0、7.5、15 和 30 mg kg⁻¹ 四个水平, 分别称为无磷(NP)、低磷(LP)、中磷(MP)和高磷(HP); 土壤水分设饱和持水量(小钵加水 875 g pot⁻¹, 大钵加水 2450 g pot⁻¹)、饱和持水量的 80% 和饱和持水量的 60% 三个水平, 分别称为高水(HW)、中水(MW)和低水(LW)。

1.3 加水量与样品处理

根据上述土壤含水量, 每天加水一次, 前期没有考虑水稻的生长量, 每天保持恒重, 中后期根据水稻生长情况适当考虑, 分别在播种后 30 d、60 d 和收获期(164 d) 分 3 次测定水稻各部分的生物量, 取样后在 70℃ 的条件下保持 24 h, 测定水稻茎和种子的烘干重。

2 结果与分析

2.1 不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量的影响

2.1.1 耗水总量 表1表明了旱作水稻的耗水量, 同一土壤含水量如果以高磷时耗水量为 100%, 则中磷时为 81.4% ~ 101.9%, 平均为 95%; 低磷为 74.9% ~ 99.5%, 平均为 89.1%; 无磷为 38.9% ~ 73.3%, 平均为 57.4%。同一施磷量如果以高水时耗水量为 100%, 则中水时耗水量为 88.0% ~ 122.6%, 平均为 97.9%; 低水时为 56.5% ~ 91.2%, 平均为 75.36%。这说明在同一土壤含水量条件下, 旱作水稻的耗水量随着施磷量的减少而减少, 以苗期 30 d 减少最大, 苗期 60 d 和全生育期减少较小; 不同施磷量以无磷条件下减少的幅度最大, 同一施磷量, 旱作水稻的耗水量随着土壤含水量的降低而下降, 以低水时减少的幅度最大, 但苗期 30 d 则以中水时最高。此外, 土壤水分和施磷量对旱作水稻耗水量的影响极显著, 且交互作用明显。

这是由于当土壤中水、磷不足时, 旱作水稻根系能够充分吸收土壤中的水分和养分满足自己的发育, 而茎秆的生长则相对较慢, 虽然耗水量较少, 但所形成的生物量很低; 当土壤中水磷充足时, 在满足根系正常发育后使茎秆的生长更加旺盛, 尽管水稻的耗水量较大, 但所形成的生物量很大。因此, 土壤水分为中水就能完全满足水稻的正常生理需求, 这是因为适当的水分使土壤保持良好的通气状况, 并能满足水稻幼苗期以蒸发消耗中后期以蒸腾消耗为主的水分需求, 最终获得最大的生物产量, 同时, 有利于养分的转化和供给, 使水肥间发挥良好的协同效应。这与鲁如坤等的研究结果基本一致^[5,6]。

表 1 旱作水稻苗期和全生育期的总耗水量(g pot⁻¹)

Table 1 Total water consumption in seedling stage and whole stage of paddy rice grown in aerobic soil

| 供磷水平 P applied | 苗期 ¹⁾ Seedling | | | 苗期 ²⁾ Seedling | | | 全生育期 Whole stage | | |
|-------------------|---------------------------|-----------|-----------|---------------------------|----------|----------|------------------|-----------|-----------|
| | LW | MW | HW | LW | MW | HW | LW | MW | HW |
| NP | 1 358.7e ³⁾ | 1 431.0de | 1 489.3de | 2 994.7j | 4 082.7h | 3 912.7i | 17 009g | 30 381f | 30 099f |
| LP | 1 602.3cd | 1 879.0b | 1 902.3b | 4 729.7g | 6 966.3e | 7 916.3b | 32 724f | 45 964cd | 48 766abc |
| MP | 1 728.7bc | 2 152.0a | 1 755.0bc | 5 405.7i | 7 397.0d | 8 169.0a | 41 362e | 45 032cde | 50 117ab |
| HP | 1 855.0b | 2 223.3a | 2 154.7a | 5 506.7i | 7 680.0c | 8 023.3b | 43 709de | 46 168bc | 52 315a |
| 变异分析 | | | | | | | | | |
| 磷 (P) | <i>p</i> < 0.01 | | | <i>p</i> < 0.01 | | | <i>p</i> < 0.01 | | |
| 水 (W) | <i>p</i> < 0.05 | | | <i>p</i> < 0.01 | | | <i>p</i> < 0.01 | | |
| P × W | <i>p</i> < 0.01 | | | <i>p</i> < 0.01 | | | <i>p</i> < 0.01 | | |

1) 水稻出苗后 30 d; 2) 水稻出苗后 60 d; 3) 表中同一字母表示用新复极差测验多重比较(Duncan's *s*) *p* < 0.01 水平无显著性差异

2.1.2 耗水动态 图1显示了旱作水稻全生育期的耗水动态, 根据其变化状况可划分为生长前期(5月13日~6月26日)、生长盛期(6月27日~8月29日)和生长后期(8月29日~10月22日)三个发育阶段。不同水磷处理下的耗水动态基本一致, 只是耗水量差异较大。这主要是受水稻的生理特性所决定的。

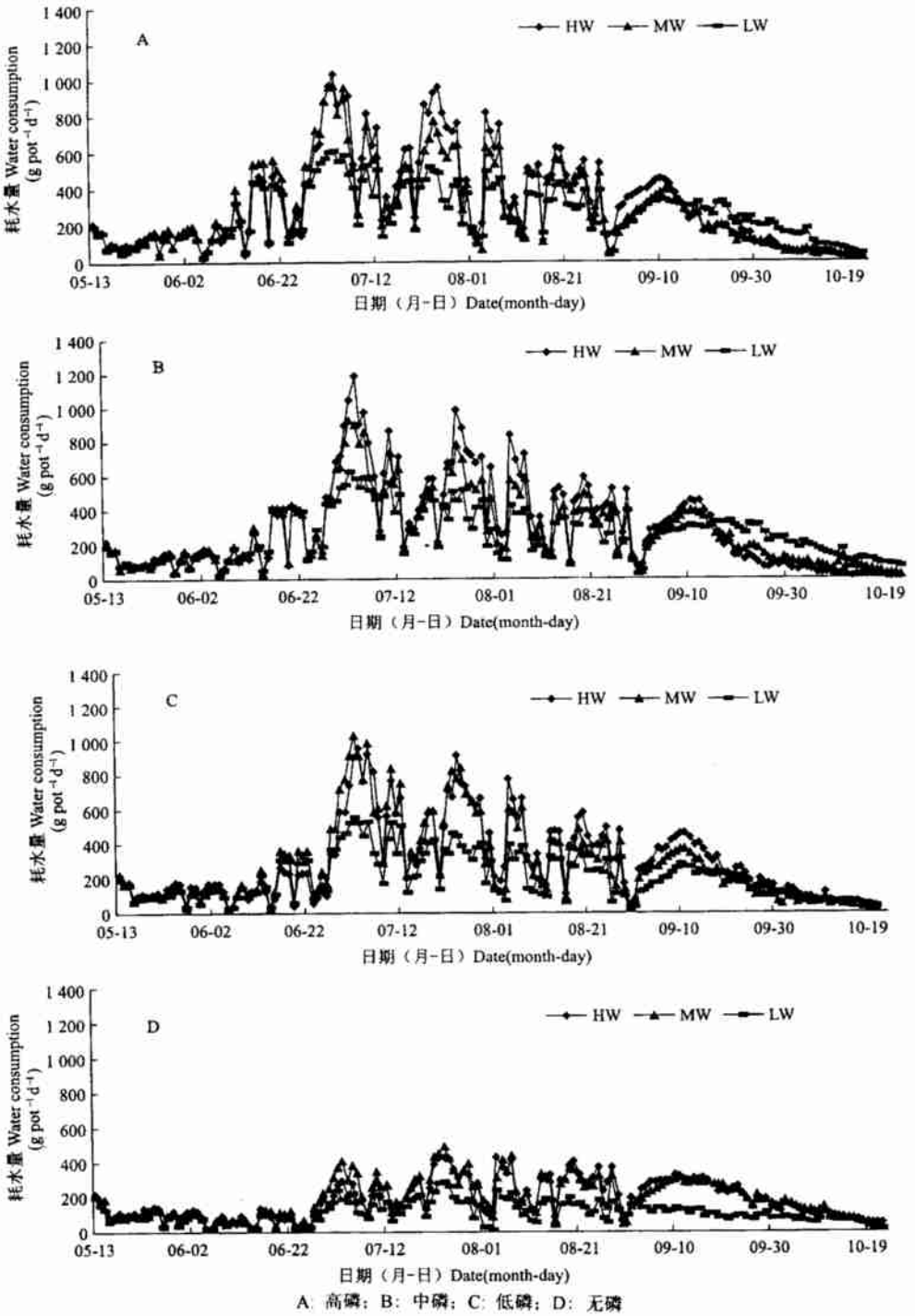


图1 不同供磷水平下水稻耗水量动态

Fig. 1 Water consumption dynamics of paddy rice under different levels of P applied

2.1.3 不同时期耗水量 从表2可以看出,旱作水稻生长前期耗水量占全生育期的12.5%~18.4%,平均每天耗水67.6~197.4g pot⁻¹;生长盛期占53.3%~68.9%,平均每天耗水145.4~586.7g pot⁻¹;生长后期占16.4%~33.3%,平均每天耗水85.9~199.1g pot⁻¹。因此旱作水稻耗水量为生长盛期>生长后期>生长前期。不同水分和施磷量条件下的耗水量在生长前期主要受施磷量的影响,水分影响较小,但占总耗水量的比例则受水磷的交互作用影响,同一施磷量随着土壤含水量的下降比例上升,同一土壤含水量随着施磷量的增加比例下降,因此,当土壤含水量为中水时旱作水稻的耗水量占总耗水量的比例最大。生长盛期耗水量及占总耗水量的比例均明显受水磷交互作用的影响,即随着土壤含水量和施磷量的下降耗水量下降,当土壤含水量为低水时其占总耗水量的比例最小。生长后期影响旱作水稻耗水量的主要因素是水,在满足水分供应的条件下,施磷量对耗水量影响很小,只有在水分供应不足时,施磷量增加才能促进耗水量也增加。

表2 旱作水稻不同时期的耗水量

Table 2 Water consumptions at different stages of paddy rice grown in aerobic condition

| 磷水水平 Level of P and water applied | 生长前期 ¹⁾ In earlier period of experiment | | | 生长盛期 ²⁾ In blourisling period of experiment | | | 生长后期 ³⁾ In later period of experiment | | |
|--|--|-------------------------------------|---|--|-------------------------|---|--|-------------------------------------|---|
| | 总耗水 | 占总耗 | 平均 | 总耗水 | 占总耗 | 平均 | 总耗水 | 占总耗 | 平均 |
| | Total | 水(%) | | Total | 水(%) | | Total | 水(%) | |
| | consumption of water (g pot ⁻¹) | In total consumption of water | (g pot ⁻¹ d ⁻¹) | consumption of water (g pot ⁻¹) | consumption of water | (g pot ⁻¹ d ⁻¹) | consumption of water (g pot ⁻¹) | In total consumption of water | (g pot ⁻¹ d ⁻¹) |
| HP-HW | 7893.0 | 15.1 | 175.4 | 34480.2 | 65.9 | 547.3 | 9942.1 | 19.0 | 177.5 |
| HP-MW | 8881.3 | 18.4 | 197.4 | 30661.9 | 63.7 | 486.7 | 8624.1 | 17.9 | 154.0 |
| HP-LW | 7593.0 | 18.3 | 168.7 | 22638.5 | 54.7 | 359.3 | 11147.4 | 26.9 | 199.1 |
| MP-HW | 7390.2 | 14.7 | 164.2 | 34525.4 | 68.9 | 548.0 | 8201.1 | 16.4 | 146.4 |
| MP-MW | 7387.2 | 16.4 | 164.2 | 28724.7 | 63.8 | 455.9 | 8919.4 | 19.8 | 159.3 |
| MP-LW | 7438.5 | 18.0 | 165.3 | 22173.4 | 53.6 | 352.0 | 11749.4 | 28.4 | 209.8 |
| LP-HW | 6101.5 | 12.5 | 135.6 | 31736.1 | 65.1 | 503.7 | 10928.2 | 22.4 | 195.1 |
| LP-MW | 6808.2 | 14.8 | 151.3 | 30749.4 | 66.9 | 488.1 | 8406.2 | 18.3 | 150.1 |
| LP-LW | 6029.8 | 18.4 | 134.0 | 19196.1 | 58.7 | 304.7 | 7498.2 | 22.9 | 133.9 |
| NP-HW | 4004.7 | 13.3 | 89.0 | 16057.2 | 53.3 | 254.9 | 10036.4 | 33.3 | 179.2 |
| NP-MW | 3803.0 | 12.5 | 84.5 | 17009.9 | 56.0 | 270.0 | 9568.1 | 31.5 | 170.9 |
| NP-LW | 3043.0 | 17.9 | 67.6 | 9157.2 | 53.8 | 145.4 | 4808.1 | 28.3 | 85.9 |

1) 5月13日~6月26日;2) 6月27日~8月29日;3) 8月30日~10月22日

这是由于旱作水稻苗期生物量很小,根系通过对磷的大量吸收来满足自己的发育,对水的需求较小;生长中期根系充分发育需要吸收大量的水分和磷来满足茎秆的生长;生长后期除满足种子对磷的需求外,需要一定水分来满足水稻正常的生理需求。这与程宪国等的研究结果基本一致^[7,8]。

2.2 不同水分和施磷量对旱作水稻水分利用率的影响

表3表明,旱作水稻在苗期30d时的水分利用率随施磷量的增加而提高,但以不施磷与施磷间差异大,施入中磷与高磷间差异很小;不同土壤含水量时的水分利用率以中水>高水>低水,且以无磷和低磷时差异大,中磷、高磷时差异小。旱作水稻苗期60d和全生育期的水分利用率总体是随施磷量的

增加而提高,但以不施磷与施磷间差异大,施入低磷与中磷、高磷间差异很小;不同土壤含水量时的水分利用率以低水>中水>高水,且以无磷和低磷时差异大,低磷、中磷、高磷间差异小。总体来说,旱作水稻的水分利用率均以低水和低磷到中磷时最高。此外,土壤水分和施磷量对旱作水稻各部分生物量均有显著影响,且交互作用明显。

这是由于当土壤中水磷不足时,旱作水稻根系能够正常发育,而茎秆则生长较慢,形成的生物量很低,因而水分利用率低;当土壤中水磷充足时,旱作水稻根系和茎秆均能旺盛生长,形成的生物量很大,因而水分利用率也高。这与赵彦锋等的研究结果完全一致^[9~11]。

表3 水稻茎和籽粒的水分利用率

Table 3 Water use efficiencies in shoots and seeds of paddy rice of pot culture(g L⁻¹)

| 供磷水平 Level of P applied | 茎 Shoots | | | | | | | | | 籽粒 Grains | | |
|----------------------------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|-------|--------|------------------|--------|---------|------------------|-------|--------|
| | 苗期 ¹⁾ Seedling | | | 苗期 ²⁾ Seedling | | | 全生育期 Whole stage | | | 全生育期 Whole stage | | |
| | LW | MW | HW | LW | MW | HW | LW | MW | HW | LW | MW | HW |
| NP | 0.24d ³⁾ | 0.32d | 0.25d | 0.76d | 0.59d | 0.70d | 0.68d | 0.65d | 0.61d | 0.37d | 0.35d | 0.53c |
| LP | 0.69c | 0.87bc | 0.71c | 1.92a | 1.60b | 1.31c | 1.00a | 0.91ab | 0.79c | 0.76a | 0.54c | 0.61bc |
| MP | 0.97ab | 1.03ab | 1.02ab | 2.08a | 1.56b | 1.46bc | 1.00a | 0.95ab | 0.86bc | 0.77a | 0.76a | 0.70ab |
| HP | 1.12a | 1.09ab | 1.06ab | 1.89a | 1.65b | 1.30c | 0.98a | 0.98a | 0.89abc | 0.76a | 0.80a | 0.69ab |

变异分析

| | | | | |
|-------|------------|------------|------------|------------|
| 磷 (P) | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ |
| 水 (W) | $p = 0.12$ | $p < 0.01$ | $p < 0.01$ | $p = 0.76$ |
| P × W | $p = 0.59$ | $p < 0.01$ | $p = 0.26$ | $p < 0.01$ |

1) 水稻出苗后 30 d; 2) 水稻出苗后 60 d; 3) 表中同一字母表示用新复极差测验多重比较(Duncan's) $p < 0.01$ 水平无显著性差异

表4研究了旱作水稻不同时期的水分利用率。0~30 d时的水分利用率随着施磷量的增加而增加,31~60 d期间以低磷时最高,61~164 d期间以中磷时最高,但施磷与不施磷之间差异最大;不同土壤含水量条件下,0~30 d以中水时最高,31~60 d以及61~164 d以低水时最高;在水稻生长前期和不施磷的条件下,水分利用率变化很小,而生长中期则明显增加,生长后期又逐渐减少;因此,总体上旱作水稻的水分利用率是低水到中水和施磷量为中量到高量时最高,不同生长时期以生长中期>生长后期>生长前期。

这说明土壤水分为中水时供磷量为中量到高量时,有利于养分的转化和供给,使水肥间发挥良好的协同效应,旱作水稻能够获得最大的生物产量,同时,中量到高量的磷在提高产量的同时对提高作物的抗旱能力,提高土壤水分的利用效率有明显的影响。这与在中国干旱地区的一些研究结果完全一致^[10,12]。此外,不同的土壤含水量对矿质养分在土壤和作物体内的运移有重要的促进作用,因而旱作水稻在生长后期水分利用率上升^[13]。

表4 旱作水稻不同时期的水分利用率

Table 4 Water use efficiencies of different growth stages of paddy rice grown in aerobic condition (g L^{-1})

| 供磷水平 Level of P applied | 0~ 30d | | | 31~ 60d | | | 61~ 164d | | |
|----------------------------|--------|-------|-------|---------|------|------|----------|------|------|
| | LW | MW | HW | LW | MW | HW | LW | MW | HW |
| NP | 0.40a | 0.50a | 0.39a | 1.65 | 1.45 | 1.39 | 1.41 | 1.30 | 1.44 |
| LP | 0.94a | 1.21a | 0.99a | 3.56 | 2.81 | 2.37 | 2.08 | 1.73 | 1.68 |
| MP | 1.25a | 1.45a | 1.42a | 3.35 | 2.75 | 2.22 | 2.08 | 2.08 | 1.80 |
| HP | 1.43a | 1.61a | 1.50a | 3.18 | 2.74 | 2.07 | 2.04 | 2.10 | 1.88 |

3 结论

土壤水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率有极显著的影响,且二者间的交互作用明显。

旱作水稻(包括种子)的耗水量均以中水到高水和施磷量为中量到大量时最高,水分利用率以低水到中水和施磷量为低量到中量时最高,不同生长阶段的耗水量和水分利用率均为生长中期>后期>前期。

因此,旱作水稻适合有一定水源和红壤丘岗地区种植,水分灌溉应遵守“先少中多后少”的原则,在常规氮、钾和中量到大量磷肥投入条件下,保证中水就能获得较好的产量。

参考文献

- 李秧秧. 无机营养提高作物抗旱的生理基础. 北京: 科学出版社, 1998. 222~ 232
- 钱晓晴, 沈其荣, 徐勇. 不同水分管理方式下水稻的水分利用效率与产量. 应用生态学报, 2003, 14(3): 399~ 404
- 石英, 沈其荣, 茆泽圣. 旱作条件下水稻的生物效应及表层覆盖对它的影响. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 47~ 53
- 崔国贤, 沈其荣, 崔国清. 水稻旱作及对旱作环境的适应性研究进展. 作物研究, 2002, 3: 70~ 76
- 鲁如坤, 时正元. 施用磷肥对红壤保水能力的影响. 土壤, 2000, 32(3): 165~ 166
- 刘运武. 磷对杂交水稻空长发育及其生理效应影响的研究. 土壤学报, 1996, 33(3): 308~ 315
- 程宪国, 汪德水, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响. 中国农业科学, 1996, 29(4): 67~ 74
- He Y Q, Zhu Y G, Smith S E. Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture. Journal of Plant Nutrition, 2001, 25 (4): 913~ 925
- 赵彦锋, 吴克宁, 王同朝. 玉米苗期调控水与磷协同效应研究. 河南农业科学, 2002, (2): 4~ 7
- 汪德水. 旱地农田水肥协同效应与耦合模式. 北京: 气象出版社, 1999
- Willet I R, Higgins M L. Phosphorus sorption by reduced and re oxidized rice soils. Aust. J. Soils Res., 1978, 16: 319~ 326
- 梁银丽, 康绍忠. 限量灌水和磷营养对冬小麦产量及水分利用效率的影响. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 61~ 68
- Li F M, Song Q H, Liu H S, et al. Effects of pre-sowing irrigation and phosphorus application on water use and yield of spring wheat under semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 2001, 49: 173~ 181

EFFECT OF SOIL MOISTURE AND PHOSPHORUS SUPPLY ON WATER CONSUMPTION AND WATER USE EFFICIENCY BY PADDY RICE CULTIVATED IN AEROBIC SOIL

He Yuan-qiu^{1,2} Shen Qi-rong¹ Wang Xing-xiang² Li Zhi-ming²

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

(2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Summary

A pot culture experiment was carried out in glasshouse to investigate effect of soil moisture and phosphorus (P) on water consumption and water use efficiency by paddy rice cultivated in aerobic soil. The results obtained were as follows. Soil water and P fertilization rate had significant effect on water consumption and water use efficiency by paddy rice, and there was also a significant interaction between them. The highest water consumption is at middle soil moisture to high soil moisture and middle P supply to high P supply. Thus, water consumption percentages in the total water consumption during the whole growth stages were 15% ~ 18%, 63% ~ 68% and 16% ~ 21% at early growth stage, middle growth stage and later growth stage, respectively. The highest water use efficiency ($1.25 \sim 1.60 \text{ g L}^{-1}$) by rice in seedling period was got at low to middle soil moisture and low to middle P supply while the highest water use efficiencies by rice in middle ($2.22 \sim 3.56 \text{ g L}^{-1}$) to later stage ($1.68 \sim 2.08 \text{ g L}^{-1}$) were found at low to middle soil moisture and middle to high P supply. The order of water consumption and water use efficiency by rice in different growth stages were as follows: growth middle stage > later stage > early stage. The results obtained in this experiment could provide the theoretic base of water and P management of paddy rice grown in aerobic soil in the southern hillock areas of China.

Key words Water, Phosphorus, Paddy rice cultivated in aerobic soil, Water use efficiency