

施磷水平对 SPAC 水分能量特征的影响

吕家珑, 张一平, 刘思春, 马志刚, 梁圉社

(西北农业大学, 陕西杨陵, 712100)

摘要:通过对农业生态系统中 SPAC 水分热力学函数——偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)、偏摩尔焓($\Delta\bar{H}$)和偏摩尔熵($\Delta\bar{S}$)的研究得出:(1)高施磷水平下土壤植物间水分 $\Delta\bar{G}$ 梯度较大,有利于土壤水分向植物体的运移;施肥增加土壤与植物间水分自由能梯度的影响要大于降低土壤水自由能的影响,从而增加了植物的“提水”作用,有利于植物对土壤水分的利用,这也是“以肥调水”的科学依据。(2)高施磷水平可以平抑不同土壤含水量所导致的土壤——植物间水分 $\Delta\bar{G}$ 梯度的差异,提高水分利用率。

关键词:农业生态系统;SPAC;水分热力学函数

Effect of phosphate fertilizer application level on SPAC moisture energy characters

LU Jia-Long, ZHANG Yi-Ping, LIU Si-Chun, MA Zhi-Gang, LIANG Quan-She (Northwestern Agricultural University, Shaanxi Yangling, 712100, China)

Abstract: The thermodynamics parameters, partial molal free energy ($\Delta\bar{G}$), partial molal enthalpy ($\Delta\bar{H}$) and partial entropy ($\Delta\bar{S}$), of moisture in SPAC of agriculture ecosystem were studied, the results showed that the moisture ladder degree between soil and plant could increase under phosphate fertilizer application level. It was beneficial to transport of soil moisture from soil to plant. The increased value of $\Delta\bar{G}_s - \Delta\bar{G}_p$ is greater than the decended value of $\Delta\bar{G}_s$ and $\Delta\bar{G}_p$. Thus, the “absorption water effect” from soil of plant roots was been enhanced. It was the scientific foundation of what plant absorbed water was promoted by fertilizer as well. Higher phosphate fertilizer application level could inhabit the difference of moisture and increase soil moisture utilization ratio.

Key words: agriculture ecosystem; SPAC; moisture thermodynamics parameter

文章编号:1000-0933(2000)02-0255-09 中图分类号:Q948 文献标识码:A

土壤-植物-大气连续体(SPAC)是农业生态系统中的重要组成部分。水分热力学函数是表征水分能量及状态的重要参数,可统一应用于 SPAC,揭示农业生态系统中土壤和作物水分状态及运动规律^[1~6]。因此,探讨施磷水平对 SPAC 中水分热力学函数影响有重要意义。直至 80 年代初,国内外关于 SPAC 的研究多属于水势方面的报道,对 SPAC 水分热力学函数研究极少;到 80 年代中期,有人将水分势力学成功地应用于 SPAC,使这方面的研究有了较大进展^[1,2]。然而,植物生长的环境是多变的,农业生态系统中环境因素对 SPAC 中水分热力学函数的影响如何?这方面工作还不多,尤其是在不同施磷水平等条件下,研究 SPAC 水分热力学函数的特征,至今未见报道。本试验采用人工气候室模拟农业生态系统栽培小麦,在不同湿度、水分、温度及生育期等条件下,侧重研究施磷水平对水分热力学函数变化特征的影响,进一步了解 SPAC 水分运动规律。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

为采自西北农业大学灌溉试验站的 土耕层土壤,质地重壤,肥力中等,其有机质、全氮及全磷(P_2O_5)

含量分别为 11.1、0.78 及 1.60g/kg,碱解氮和速效磷含量分别为 54.2 和 6.96mg/kg;C. E. C. 14.6 cmol (+)/kg。将采集的土壤风干、粉碎、过筛后备用。

1.2 试验方法

本试验采用盆栽法,供试植物为半春冬小麦(品种为 7730);所用试验盆栽钵有两种,分别装风干土 3.5 kg(大盆)和 1.5 kg(小盆)。施入两种水平的过磷酸钙:0.2 g/kg风干土(低磷)和 1.4 g/kg风干土(高磷);以尿素作肥底,施入量为 0.25 g/kg风干土;将磷肥与尿素施入土壤,并混匀后在小盆中播入已露白的小麦种子 14~16 颗,加水至田间持水量,使其在室外自然生长一周后定苗,留生长一致的小麦苗 12 株。试验前,一部分盆加水至 19%(重量含不量,下同),另一部分至 25%,在土面上加盖厚约 3 cm 的砂子以减少蒸发损失水分。然后,把试验盆钵放入加拿大康维伦公司生产的 E8H 型人工气候室中,大气相对湿度分别控制为 75%和 95%;温度分别设置 20℃和 30℃;所有处理的光照均匀一致(白天有光照,夜间关闭灯光)。所有处理重复 3 次。

由于冬小麦生长期较长,为了缩短试验周期,在小麦的拔节-成熟期采用移栽进行试验研究;在 3 月初小麦返青期,每大盆移栽入采自大田的长势、分蘖一致,鲜重大致相等的小麦 4 颗 16 株,加水到田间持水量,于阴蔽条件下缓苗 8~10 d 后定苗至 14 株,然后生长到拔节-成熟期时按上述小盆的方法控制条件进行试验。

每 15 d 采集植物样品一次(采样采用破坏法,每次 1 批),在采样前一天,试验盆中插入张力计,培养平衡 1 昼夜(24 h);第二天(第 15 天),读取张力计读数,并用压力室法测定小麦叶片水势。

1.3 SPAC 水分热力学函数计算^[1]

(1)土壤水分热力学函数:

$$\Delta G_{\pm} = - \bar{V}^{\circ} \tau$$

式中, $\Delta G_{\pm}$ 为相对偏摩尔自由能; $\bar{V}^{\circ}$ 为纯水的偏摩尔体积,由化学数据表查得不同温度下的 $\bar{V}^{\circ}$ 值; τ 为土壤水吸力(张力计读数 mmHg)。

$$\Delta \bar{S}_{\pm} = - \bar{V}^{\circ} (\partial \tau / \partial T)$$

式中, $\Delta \bar{S}_{\pm}$ 为相对偏摩尔熵; T 为绝对温度; $(\partial \tau / \partial T)$ 为 $\tau \sim T$ 线性方程斜率,本文用两种温度对应土壤水吸力差值 $\Delta \tau$ 与两种温度差值 ΔT 之比($\Delta \tau / \Delta T$)计算,以下 $(\partial P / \partial T)$ 和 $(\partial \Psi_{W_{eq}} / \partial T)$ 计算法类同。

$$\Delta \bar{H}_{\pm} = \Delta G_{\pm} + T \cdot \Delta \bar{S}_{\pm}$$

式中, $\Delta \bar{H}_{\pm}$ 为相对偏摩尔焓。

(2)植物叶片水分热力学函数:

$$\Delta \bar{G}_{\text{叶}} = - \bar{V} \cdot P$$

式中, $\bar{V}$ 为叶片水分的偏摩尔体积(采用与 $\bar{V}^{\circ}$ 等值); P 为小麦叶片水势测定的压力室读数。

$$\Delta \bar{S}_{\text{叶}} = \bar{V} (\partial P / \partial T)$$

$$\Delta \bar{H}_{\text{叶}} = \Delta \bar{G}_{\text{叶}} + T \cdot \Delta \bar{S}_{\text{叶}}$$

(3)大气水分热力学函数:

$$\Psi_{W_{eq}} = \frac{RT}{\bar{V}^{\circ}} \ln(P/P^{\circ})$$

式中, $\Psi_{W_{eq}}$ 为大气水势; R 为气体常数(8.3143 J/K · mol); P/P° 是大气相对湿度,由人工气候室控制(75%,95%)。

$$\Delta G_{eq} = \bar{V}^{\circ} \cdot \Psi_{W_{eq}}$$

$$\Delta \bar{S}_{eq} = \bar{V}^{\circ} (\partial \Psi_{W_{eq}} / \partial T)$$

$$\Delta \bar{H}_{eq} = \Delta G_{eq} + T \cdot \Delta \bar{S}_{eq}$$

2 结果与讨论

据所测数据,用公式求出小麦不同生育期水分热力学函数分别列于表 1~3。

本试验采用的相对偏摩尔自由能、焓和熵这 3 种热力学函数,从不同角度反映 SPAC 中水分的状况;

相对偏摩尔焓(ΔH)反映水分以热的形式表现出的总能量变化;相对偏摩尔自由能(ΔG)反映水分子本身有效能量的高低;相对偏摩尔熵(ΔS)则反映水分子存在状态的有序程度。

2.1 SPAC 中水分热力学函数的特征

由表 1~表 3 可知,不论在小麦幼苗期、苗期还是在拔节-抽穗期,在不同温度、湿度、水分含量及磷水平下,偏摩尔自由能(ΔG)都表现出相同的规律,即土壤水的偏摩尔自由能>植物水的偏摩尔自由能>大气水的偏摩尔自由能;亦即土壤中水分能量最高,植物次之,大气最低。这样,就使土壤中的水分自发流进植物根,经茎迅速地由叶表面扩散到大气中;以湿度、温度、磷水平和含水量分别为 75%、20℃、高磷和 19%(MAha)为例,土壤水的偏摩尔自由能为植物水偏摩尔自由能的 14~19 倍,为大气水偏摩尔自由能的 512~556 倍。

表 1 SPAC 水分热力学函数(冬小麦幼苗期)*
Table 1 Thermodynamics parameters of moisture in SPAC(seeding period of winter wheat)

代号	土壤 Soil			植物 Plant			大气 Atmosphere		
Code name	ΔG	ΔS	ΔH	ΔG	ΔS	ΔH	ΔG	ΔS	ΔH
MAha	-1.260	-0.0058	-2.949	-17.64	-0.180	-70.41	-701.153	2.392	0.0618
MAhb	-0.918	-0.0038	-2.206	-12.6	-0.108	-44.26			
MAla	-1.188	-0.0043	-2.454	-16.74	-0.018	-22.02			
MAlb	-0.846	-0.0022	-1.479	-12.06	-0.126	-49.00			
MBha	-1.202	-0.0058	-2.948	-15.84	-0.180	-70.41	-725.071		0.0638
MBhb	-0.880	-0.0038	-2.206	-11.52	-0.108	-44.26			
MBla	-1.145	-0.0043	-2.455	-16.55	-0.018	-22.02			
MBlb	-0.842	-0.0022	-1.479	-10.80	-0.126	-49.00			
WAha	-1.066	-0.0079	-3.388	-19.80	-0.144	-62.01	-125.015	0.426	-0.133
WAhb	-0.594	-0.0054	-2.177	-15.30	-0.090	-41.68			
WAla	-0.828	-0.0054	-2.411	-18.54	-0.234	-87.14			
WAlb	-0.522	-0.0108	-3.688	-12.60	-0.036	-23.15			
WBha	-0.986	-0.0079	-3.387	-18.36	-0.144	-62.01	-129.279		-0.137
WBhb	-0.540	-0.0054	-2.177	-14.40	-0.090	-41.68			
WBl a	-0.774	-0.0054	-2.411	-16.20	-0.234	-87.14			
WBlb	-0.414	-0.0108	-3.688	-12.24	-0.036	-23.15			

* (1)代号 M、W 分别代表 75%和 95%的相对湿度;A、B 代表 20℃和 30℃条件;a、b 为低(19%)和高(25%)土壤含水量;h、l 表示高和低水平土壤施磷量(以下表中相同)。(2) ΔG 、 ΔS 和 ΔH 的单位分别是 J/mol、J/mol·K 和 J/mol(下面表中相同)。

小麦 3 个时期 SPAC 中偏摩尔焓表现为大气水的偏摩尔焓>土壤水的偏摩尔焓>植物水的偏摩尔焓。还是以 MAha 处理为例,大气中水的偏摩尔焓($\Delta H_{气}$)分别比土壤和植物水的偏摩尔焓高出 3.041~3.567J/K·ol 和 63.298~106.269J/K·mol;土壤水和植物水之间偏摩尔焓也相差 60.257~103.031J/K·mol。

小麦 3 个时期的偏摩尔熵(ΔS)表现的规律与偏摩尔焓(ΔH)相似,即大气水的偏摩尔熵>土壤水的偏摩尔熵>植物水的偏摩尔熵。

冬小麦不同生育期 SPAC 中土壤和植物水分 ΔG 均为前期高后期低,这是由于随小麦生长,叶面积增大,蒸腾面积和速率增大,小麦耗水加剧;叶片自由水含量减少,导致叶水分 ΔG 降低。相应亦使土壤水分 ΔG 减小。土壤和植物水分 ΔH 亦呈现小麦生长后期减小的趋势,其与植物生长后期水分 ΔG 减小有关。

2.2 施磷水平对 SPAC 水分热力学函数的影响

2.2.1 施磷水平对 SPAC 水分热力学函数的直接影响 由于在 ΔG 、 ΔH 、 ΔS 3 种热力学函数中, ΔG 与水分的运移及有效数据直接相关,因此,侧重探讨施磷水平对 SPAC 水分 ΔG 的影响。表 4~6 反映出,在其它因素相同,仅施磷水平高、低不同的条件下,除有 3 组植物水 ΔG 出现异常外,均呈现高施磷水平下,土壤及

植物水分 $\Delta\bar{G}$ 较低的规律性变化,表明在大气相对湿度、温度和土壤水分相同情况下,高施磷水平可导致土壤及植物水分能量降低,可能有两个原因:①增施磷肥促进植物生长,叶面积增大,蒸腾量增加^[3],植株根系对土壤水分吸持力增强,因而在相同初始土壤含水量条件下,土壤水分能量降低;②施磷量增加,土壤溶质势降低,导致土壤水分能量降低。而土壤水分能量降低相应会导致植株水分能量降低。

表 2 SPAC 水分热力学函数(冬小麦幼苗期)*

Table 2 Thermodynamics parameters of moisture in SPAC(seeding period of winter wheat)

代号	土壤 Soil			植物 Plant			大气 Atmosphere		
Code name	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$
MAha	-1.354	-0.0043	-2.620	-21.24	-0.288	-105.65	-701.153	-2.392	-0.0618
MAhb	-1.001	-0.0045	-2.320	-15.48	-0.198	-73.524			
MAla	-1.282	-0.0054	-2.865	-19.80	-0.234	-88.397			
MAlb	-0.938	-0.0047	-2.310	-14.40	-0.180	-67.167			
MBha	-1.310	-0.0043	-2.620	-18.36	-0.288	-105.65	-725.071		0.0638
MBhb	-0.956	-0.0045	-2.320	-13.50	-0.198	-73.524			
MBla	-1.228	-0.0054	-2.865	-17.46	-0.234	-88.397			
MBlb	-0.889	-0.0047	-2.308	-12.60	-0.180	-67.167			
WAha	-1.206	-0.0126	-4.900	-11.70	-0.090	-38.084	-125.015	0.426	-0.133
WAhb	-0.936	-0.0198	-6.740	-10.08	-0.144	-52.294			
WAla	-1.044	-0.0054	-2.627	-10.80	-0.180	-63.576			
WAlb	-0.702	-0.0036	-1.757	-8.60	-0.234	-77.237			
WBha	-1.080	-0.0126	-4.900	-10.80	-0.090	-38.084	-129.279		-0.137
WBhb	-0.738	-0.0198	-6.740	-8.64	-0.,144	-52.294			
WBl a	-0.990	-0.0054	-2.627	-9.00	-0.180	-63.576			
WBlb	-0.666	-0.0036	-1.757	-6.30	-0.234	-77.237			

表 3 SPAC 水分热力学函数(冬小麦拔节-抽穗期)

Table 3 Thermodynamics parameters of moisture in SPAC(joint-heading period of winter wheat)

代号	土壤 Soil			植物 Plant			大气 Atmosphere		
Code name	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$
MAha	-1.368	-0.0036	-2.423	-25.74	-0.0126	-62.68	-701.153	2.392	0.0618
MAhb	-1.008	-0.0072	-3.119	-18.72	-0.144	-60.93			
MAla	-1.296	-0.0054	-2.879	-24.84	-0.108	-56.50			
MAlb	-0.972	-0.0126	-4.666	-17.82	-0.144	-60.03			
MBha	-1.332	-0.0036	-2.423	-24.48	-0.126	-62.68	-725.071		-0.0638
MBhb	-0.936	-0.0072	-3.119	-17.28	-0.144	-60.93			
MBla	-1.242	-0.0054	-2.879	-23.76	-0.108	-56.50			
MBlb	-0.846	-0.0126	-4.666	-16.38	-0.144	-60.03			
WAha	-1.224	-0.0108	-4.390	-23.58	-0.180	-76.35	-125.015	-0.426	-0.133
WAhb	-0.918	-0.0054	-2.501	-16.02	-0.162	-65.13			
WAla	-1.170	-0.0126	-4.864	-23.76	-0.270	-102.90			
WAlb	-0.900	-0.0162	-5.649	-16.74	-1.108	-48.40			
WBha	-1.116	-0.0108	-4.390	-21.78	-0.180	-78.35	-129.279		-0.137
WBhb	-0.864	-0.0054	-2.501	-16.02	-0.162	-65.13			
WBl a	-1.044	-0.0126	-4.864	-21.06	-0.270	-102.90			
WBlb	-0.738	-0.0162	-5.649	-15.66	-0.108	-40.40			

表 4 施磷水平对 SPAC 水分自由能(ΔG)的影响(幼苗期)

Table 4 Effect of application rate of phosphate fertilizer on free energy of moisture in SPAC(seeding period of winter wheat)

代号 *	I	II	III	IV	V
Code name	ΔG_s	ΔG_p	(I ~ II)	(I ~ II) ₁ **	Δ (I ~ II) ₂ ***
MAha	-1.260	-17.64	16.380	0.828	4.698
MA1a	-1.188	-16.74	15.552		4.338
MAhb	-0.918	-12.60	11.682	0.468	
MA1b	-0.846	-12.06	11.214		
MBha	-1.202	-15.84	14.638	-0.767	3.998
MB1a	-1.145	-16.55	15.405		5.447
MBhb	-0.880	-11.52	10.640	0.682	
MB1b	-0.842	-10.80	9.958		
WAha	-1.066	-19.80	18.734	1.022	4.028
WA1a	-0.828	-18.54	17.712		5.634
WAhb	-0.594	-15.30	14.706	2.628	
WA1b	-0.522	-12.60	12.078		
WBha	-0.986	-18.36	17.374	1.948	3.514
WB1a	-0.774	-16.20	15.426		3.600
WBhb	-0.540	-14.40	13.860	2.034	
WB1b	-0.414	-12.24	11.826		

* 与表 1~3 中一致, ** 在温度、湿度、水分含量一致下高磷(h)的($\Delta G_s - \Delta G_p$)与低磷(L)的($\Delta G_s - \Delta G_p$)之间的差值(表 5、6 中相同); *** 在温度、湿度和施磷量一致下,低初始土壤含水量(a)的($\Delta G_s - \Delta G_p$)与高初始土壤含水量(b)的($\Delta G_s - \Delta G_p$)之间的差值(表 5、6 中相同)。

土壤-植物间水分 ΔG 差(土壤水 ΔG —植物水 ΔG)仍呈现高施磷水平处理大于低施磷水平处理,即相同大气相对湿度、温度和土壤含水量条件下,高施磷水平土壤-植物间水分 ΔG 梯度大。同时,由表 4~6 可见,与低施磷水平相比,高施磷水平土壤水分 ΔG 降低 0.036~0.238,而土壤-植物间水分 ΔG 差值却增加了 0.234~2.268,即高施磷水平所导致土壤-植物间水分 ΔG 差值的增量远大于其所引起的土壤水 ΔG 降低量。由于在 SPAC 中水流通量与体系中任何一个过程水势差成正比^[7],也即与水分 ΔG 差值成正比。显然高施磷水平导致土壤-植物间水分 ΔG 差值增大有利于土壤水分向植物体的运移。因此,从能量观点看,增施肥料可降低土壤水分能量,使土壤水分有效性降低,但却增加了土壤-植物间水分能量梯度,且能量梯度的增量远大于土壤水分能量的减小量,从而增强了植物的“提水”作用,有利于植物对土壤水分的利用。因而“以肥调水”从水分能量上剖析,主要是通过增施肥料,增加土壤-植物间水分能量梯度,增强作物对土壤水分的利用,从而在同样土壤含水量条件下,提高了土壤水分利用效率。

2.2.2 施磷水平对调节土壤含水量与 SPAC 水分能量关系的作用 表 1~3 显示,大气相对湿度、温度和施磷水平相同情况下,初始土壤含水量高(25%),相应的土壤水分 ΔG 、植株叶水分 ΔG 较高,而土壤-植物间水分 ΔG 差值较小,这与一定土壤条件下,一般研究结论相符^[7]。

由表 4~6 可知,在相同大气湿度、温度和同样初始土壤水分含量差异(19%(a)~25%(b)),呈现高施磷水平时,a、b 两种含水量差异下,土壤-植物间水分 ΔG 差值的差异较小的趋势,除 4 组 Δ (I—II)₂ 出现异常外,均表现出高磷水平时小于低磷水平,其差值在高施磷水平下为 1.350~7.254,平均为 4.629,而低施磷水平下为 1.818~6.984,平均 4.860,显示高施磷水平可平抑不同土壤含水量所导致的土壤-植物间水分 ΔG 梯度的差异,这与施磷量增加,导致高含水量(25%)条件下土壤-植物间水分 ΔG 差值的增幅(0.810~2.628)大于低含水量(19%)下土壤-植物间水分 ΔG 差值的增幅(0.630~1.022)有关。

2.2.3 施磷水平对 SPAC 水势温度效应的影响 表 7~9 分别列出了土壤、植物(冬小麦)和大气的水势温度效应。

由表中数据可知,温度对冬小麦 3 个时期的土壤水势、叶水势及大气水势有显著的影响。随温度的升高,土壤水势、叶水势均升高,而大气水势降低。这是由于温度升高后,土壤水和小麦叶片水的粘度减小、活性增大,因而水分能量增加。同样情况下,温度升高,使空气中水分子密度增加,分子间的相互作用力增大,而使其活性减小,因而,大气水势随温度升高而降低。说明增温可提高土壤、植物水分能量,提高水分有效性;这亦与前人结论一致^[2]。

此外,由表 4~6 也可看出,在大气相对湿度、初始土壤含水量相同情况下,与低施磷水平比较,高施磷水平的土壤水势温度效应呈现较低趋势,这与前述高施磷水平导致土壤水分能量降低,自由活性水分子减少,相应增温对水分粘度降低的效应减弱有关。施磷水平对植物水势温度效应未显示规律性影响,可能与植物中吸收的磷素量相对较少有关。

表 5 施磷水平对 SPAC 水分自由能(ΔG)的影响 (苗期)

Table 5 Effect of application rate of phosphate fertilizer on free energy of moisture in SPAC(seeding period of winter wheat)

代号 Code name	I ΔG_s	II ΔG_P	III (I ~ II)	IV (I ~ II) ₁ **	V $\Delta(I ~ II)_2$ ***
MAha	-1.354	-21.24	19.886	1.368	5.407
MA1a	-1.282	-19.80	18.518		5.056
MAhb	-1.001	-15.48	14.479	1.017	
MA1b	-0.938	-14.40	13.462		
MBha	-1.310	-18.36	17.050	0.818	4.506
MB1a	-1.228	-17.46	16.232		4.521
MBhb	-0.956	-13.50	12.544	0.833	
MB1b	-0.889	-12.60	11.711		
WAha	-1.206	-11.70	10.494	0.738	1.350
WA1a	-1.044	-10.80	9.756		1.818
WAhb	-0.936	-10.08	9.144	1.206	
WA1b	-0.702	-8.64	7.938		
WBha	-1.080	-10.80	9.720	1.710	1.818
WB1a	-0.990	-9.00	8.010		2.376
WBhb	-0.738	-8.64	7.902	2.268	
WB1b	-0.666	-6.30	5.634		

- 3 小结
- 3.1 SPAC 中土壤水的偏摩尔自由能>植物水的偏摩尔自由能>大气水偏摩尔自由能。大气水的偏摩尔焓>土壤水的偏摩尔焓>植物水的偏摩尔焓。大气水的偏摩尔熵>土壤水的偏摩尔熵>植物水的偏摩尔熵。随着冬小麦的生长,前期的土壤和植物叶片水分偏摩尔自由能和偏摩尔焓均呈现高于后期的趋势。
- 3.2 在其它因素相同时,施磷量高的处理,土壤和植物水分偏摩尔自由能(ΔG)较低,而土壤与植物间的 ΔG 差值较高,也就是说高施磷水平土壤-植物间水分 ΔG 梯度大,这样就有利于土壤水分向植物体的运移,而且,施肥增加土壤与植物间 ΔG 梯度的影响要大于降低土壤水自由能的影响,从而增加了植物的“提水”作用,有利于植物对土壤水分的利用。这也是“以肥调水”的科学依据。
- 3.3 初始土壤含水量高,相应土壤水分 ΔG 、植物叶水分 ΔG 较高,而土壤-植物间水分 ΔG 差值较小。但在相同大气湿度、温度和同样土壤水分含量差异下,呈现高施磷水平时, $a(19\%)$ 、 $b(25\%)$ 两种初始土壤含水量差异下,土壤-植物间水分 ΔG 差值较小的趋势,显示高施磷水平可以平抑不同初始土壤含水量所导致的土壤-植物间水分 ΔG 梯度的差异。

表 6 施磷水平对 SPAC 水分自由能($\Delta\bar{G}$)的影响(拔节-抽穗期)

Table 4 Effect of application rate of phosphate fertilizer on free energy of moisture in SPAC(joint-heading period of winter wheat)

代号	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V
Code name	$\Delta\bar{G}_S$	$\Delta\bar{G}_P$	(I ~ Ⅱ)	(I ~ Ⅱ) ₁ **	Δ (I ~ Ⅱ) ₂ ***
MAha	−1.368	−25.74	24.372	0.828	6.660
MA1a	−1.296	−24.84	23.544		6.696
MAhb	−1.008	−18.72	17.712	0.864	
MA1b	−0.972	−17.82	16.848		
MBha	−1.332	−24.48	23.148	0.630	6.804
MB1a	−1.242	−23.76	22.518		6.984
MBhb	−0.936	−17.28	16.344	0.810	
MB1b	−0.846	−16.38	15.534		
WAha	−1.224	−23.58	22.356	−0.234	7.254
WA1a	−1.170	−23.76	22.590		6.750
WAhb	−0.918	−16.02	15.102	−0.738	
WA1b	−0.900	−16.74	15.840		
WBha	−1.116	−21.78	20.66	0.648	5.508
WB1a	−1.044	−21.06	20.016		5.094
WBhb	−0.864	−16.02	15.156	0.234	
WB1b	−0.738	−15.66	14.922		

表 7 土壤-植物-大气的水势温度效应(幼苗期)

Table 7 Effect of temperature on water potential in SPAC(eeding period of winter wheat)

相对湿度 (%)	水分 (%)	磷水平	温度 (C)	土壤		植物		大气	
				Soil		Plant		Atmosphere	
				水势	温度效应	水势	温度效应	水势	温度效应
Relative humidity	Water	Phosphate level	Temperature	Water potential	Temperature effect	Water potential	Temperature effect	Water potential	Temperature effect
				(KPa)	(KPa/℃)	(KPa)	(KPa/℃)	(KPa)	(KPa/℃)
75	19	高	20	−70.0	0.32	−980	10.0	−38952.9	−132.9
		High	30	−66.8		−880		−40281.7	
		低	20	−66.0		−930			
		low	30	63.6	0.24	−920	1.00		
		高	20	−51.0		−700			
		High	30	−48.9		−640			
	25	低	20	−47.0	0.21	−670	6.00		
		Low	30	−45.8		−600			
		高	20	−59.2	1.89	−1100	7.00	−6945.3	
		High	30	−54.8		−1020		−7182.2	
		低	20	−46.0		−1030			
		Low	30	−43.0	0.30	−900	13.00		
95	19	高	20	−33.0		−850			−236.9
		High	30	−30.0		−800			
		低	20	−29.0		−700			
	25	高	20	23.0	0.60	−680	5.00		
		High	30						
		低	30						

表 8 土壤-植物-大气的水势温度效应(苗期)

Table 8 Effect of temperature on water potential in SPAC(seeding period of winter wheat)

相对湿度 (%) Relative Hymidity	水分 (%) Water	磷水平 Phosphate level	温度 (℃) Temperature	土壤 Soil		植物 Plant		大气 Atmosphere	
				水势 Water potential (KPa)	温度效应 Temperature effect (KPa/℃)	水势 Water potential (KPa)	温度效应 Temperature effect (KPa/℃)	水势 Water potential (KPa)	温度效应 Temperature effect (KPa/℃)
75	19	高 High	20	−75.2	0.24	−1180	16.0	−38952.9 40281.7	−132.9
			30	−72.8		−1020			
		低 Low	20	−71.2	−0.30	−1100	1.30		
			30	−68.2		−970			
	25	高 High	20	−55.1	0.20	−800	5.00		
			30	−53.1		−750			
		低 Low	20	−52.1	0.27	−800	10.00		
			30	−49.4		−700			
95	19	高 High	20	−67.0	0.70	−650	5.00	−6945.3 −7182.2	−236.9
			30	−60.0		−600			
		低 Low	20	−58.0	0.30	−600	10.0		
			30	−55.0		−600			
	25	高 High	20	−52.0	1.10	−560	8.00		
			30	−41.0		−480			
		低 Low	20	−39.0	0.20	−480	13.0		
			30	−37.0		−350			

表 9 土壤-植物-大气的水势温度效应(拔节-抽穗期)

Table 9 Effect of temperature on water potential in SPAC(joint-heading period of winter wheat)

相对湿度 (%) Relative Hymidity	水分 (%) Water	磷水平 Phosphate level	温度 (℃) Temperature	土壤 Soil		植物 Plant		大气 Atmosphere	
				水势 Water potential (KPa)	温度效应 Temperature effect (KPa/℃)	水势 Water potential (KPa)	温度效应 Temperature effect (KPa/℃)	水势 Water potential (KPa)	温度效应 Temperature effect (KPa/℃)
75	19	高 High	20	−76.2	0.20	−1430	7.00	−38952.9 −40281.7	−132.9
			30	−74.0		1360			
		低 Low	20	−72.0	0.30	−1380	6.00		
			30	−69.0		1320			
	25	高 High	20	−56.0	0.40	−1040	8.00		
			30	−52.0		960			
		低 Low	20	−54.0	0.70	−990	8.00		
			30	−47.0		−910			
95	19	高 High	20	−68.0	0.40	−1310	10.00	−6945.3 −7182.2	−236.9
			30	−62.0		1210			
		低 Low	20	−65.0	0.70	−1320	15.00		
			30	−58.0		−1170			
	25	高 High	20	−51.0	0.30	−980	9.00		
			30	−48.0		−890			
		低 Low	20	−50.0	0.90	−930	6.00		
			30	−41.0		870			

3.4 随温度的升高,土壤水势、小麦叶水势均升高,大气水势有所下降。说明增温可以提高土壤、植物水分能量,提高水分有效性。

参考文献

- [1] 高俊风,张一平,白锦鳞,等. SPAC 水分热力学函数及幼苗各叶位水分状况. 西北农业大学学报,17(1):34~37.
- [2] 高俊风,张一平,白锦鳞,等. 不同水分状况下 SPAC 水分热力学函数特征和水势温度效应. 西北农业大学学报,1990,18(4):51~55.
- [3] 吕家珑,刘思春,张一平,等. 土壤-植物体系磷素运移机理. 中国西北旱作地区农业可持续发展国际学术研讨会论文集,西安:世界图书出版公司,1997. 343~349.
- [4] 劳 P F [美]. 土壤物理化学. 北京:农业出版社,1985. 36~66.
- [5] Sposito, G. The thermodynamics of soil solutions, New York: Oxford University Press. 1981. 7~16, 33~60.
- [6] Kolaian, J. H. and Low, P. F. Thermodynamic properties of water in suspensions of montmorillonite. *Clays and clay minerals*. 1962, 9: 71~84.
- [7] 朱祖祥. 土壤学(上册). 北京:农业出版社,1983. 138~140.