

不同肥力水平农田生态系统 SPAC 水分状态及能量特征

刘思春, 王 玉, 吕家珑, 张一平, 陈建文

(西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过对农田生态系统土壤-植物-大气连续体系(SPAC)水分、温度等昼夜观测,确定温度是影响 SPAC 水分能量的重要因素,土壤水势呈现温度正效应,植物、大气水势呈现温度负效应。温度与土壤-植物间水势差(ψ_{s-p})和植物-大气间水势差(ψ_{p-a})呈正相关。农田生态系统 SPAC 水分热力学函数研究得出,不论高、低肥区,冬小麦在不同生长发育时期,水分的相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)均为土壤>植物>大气;水分相对偏摩尔熵($\Delta\bar{S}$)、焓($\Delta\bar{H}$)均为大气>植物>土壤;冬小麦在拔节期和扬花期,土壤水 $\Delta\bar{G}$ 皆为高肥区<低肥区;植物水分 $\Delta\bar{G}$ 拔节期为高肥区>低肥区,扬花期相反为高肥区<低肥区;两个生育期大气水分 $\Delta\bar{G}$ 均为高肥区>低肥区。在拔节期土壤-植物间水分的 $\Delta\bar{G}$ 差值($\Delta\bar{G}_{s-p}=\Delta\bar{G}_s-\Delta\bar{G}_p$)、植物-大气间水分 $\Delta\bar{G}$ 差值($\Delta\bar{G}_{p-a}=\Delta\bar{G}_p-\Delta\bar{G}_a$)均为高肥区<低肥区,扬花期 $\Delta\bar{G}_{s-p}$ 为高肥区>低肥区,而 $\Delta\bar{G}_{p-a}$ 为高肥区<低肥区。

关键词:农田生态系统; SPAC; 水势差; 水分热力学函数; $\Delta\bar{G}$ 差值

The Characteristics of Water State and Energy in SPAC of Farm Ecosystem with Different Fertilities

LIU Si-Chun, WANG Yu, LU Jia-Long, ZHANG Yi-Ping, CHEN Jian-Wen (Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (12): 2104~2110.

Abstract: Water thermodynamic functions are important indexes of water states and its energy in the Soil-Plant-Atmosphere Continuum space (SPAC), space and play an important role in SPAC studies. Experiments with winter wheat in the joint and heading growth periods in different fertility plots were carried out to study the energetic characteristics and through SPAC in farm ecosystem with different fertilities.

Based on the day and night observation of water and temperature in the SPAC of farm ecosystems, it was shown that temperature is one of the important factors which affect water energy in SPAC. When the farm soil water content of in experimental fields was 18.3%, soil water potential was in positive linear correlation with temperature, the water potential of wheat leaves was in negative linear correlation with the temperature and the air water potential decreased with an increasing temperature. The difference between the soil potential and the plant water potential space (ψ_{s-p}) and between the plant water potential and the air water potential (ψ_{p-a}) were positively correlated with temperature.

Through analyzing the water thermodynamic function in SPAC, the result showed that with either high or low fertility, at any growing period of winter wheat, the water relative to partial molar Gibbs free energy ($\Delta\bar{G}$) was soil>plant>air. Otherwise, the water relative to partial molar enthalpy ($\Delta\bar{H}$) and the relative water partial molar entropy ($\Delta\bar{S}$) were air > plant > soil.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49901009)

收稿日期:2002-12-26

作者简介:刘思春(1963~),男,陕西人,农艺师。从事土壤物理学研究工作。E-mail:LJL@public.xa.sm.cn

At the joint and heading growth periods, the $\Delta\bar{G}$ of soil water was high fertility < low fertility; at the joint period, the $\Delta\bar{G}$ of plant water was high fertility > low fertility, but at the heading period, it was reversed as high fertility < low fertility. At two growing periods, the $\Delta\bar{G}$ of air water was high fertility > low fertility. At the joint period, the $\Delta\bar{G}$ margin ($\Delta\bar{G}_{S-P} = \Delta\bar{G}_S - \Delta\bar{G}_P$) difference between soil and plant water, and the $\Delta\bar{G}$ margin ($\Delta\bar{G}_{P-A} = \Delta\bar{G}_P - \Delta\bar{G}_A$) difference between plant and air water were high fertility < low fertility comma but at the heading period, the $\Delta\bar{G}_{S-P}$ of soil and plant water was high fertility > low fertility, while the $\Delta\bar{G}_{P-A}$ of plant and air water was high fertility < low fertility. The heading period was the crucial period for winter wheat and the ability to supplying water of high fertility land was strong. At the same time, the water loss through plant transpiration was small, so the high fertility land can supply more water to winter wheat, which is a key factor to high yields of winter wheat.

Key words: agricultural ecosystem; water potential margin; SPAC; $\Delta\bar{G}$ margin; moisture thermodynamics function

文章编号:1000-0933(2002)12-2104-07 中图分类号:Q965.9 文献标识码:A

水分自土壤经由植物进入大气,是一个统一的动态过程,即土壤-植物-大气连续体系(SPAC)水分运移过程。对于这个过程从能量角度进行研究,可以揭示农田生态系统中 SPAC 水分运动规律^[1~6];水分热力学函数是表征水分能量及状态的参数,是判定 SPAC 水分状态及能量特征的重要指标,在 SPAC 水分研究具有重要意义^[2,3,5]。关于 SPAC 水分运移的研究,国内外虽有报道,但多系 SPAC 中的水流阻力及水容,以及 SPAC 中水流的电模拟等理论探讨或盆栽试验^[2~13],局限性较大,特别是在农田生态系统中 SPAC 水分运动及能量特征的研究涉及较少。作者利用农田不同肥力水平小区,对小麦在拔节期、扬花期 SPAC 水分状态及能量特征进行研究,为进一步开展此领域里的工作、积累资料。

1 试验设置和方法

1.1 试验设置

试验设置于陕西关中西部西北农林科技大学农作一站,不同肥力定位试验田较高肥力区(简称高肥区)和较低肥力区(简称低肥区),试验地区属黄土高原半湿润地带。土壤为 土,土壤的基本性质见表 1,小麦品种为小偃 6 号(冬小麦)。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 The basic properties of experimental soil

肥力 Fertility	有机质 Organic mater (g/kg)	全 N Total-N (g/kg)	速效氮 Available-N (mg/kg)	全 P Total-P (g/kg)	速效磷 Available-P (mg/kg)	全 K Total-K (g/kg)	速效钾 Available-K (mg/kg)	比表面 Specific surface(m ² /g)
高肥区 ^①	16.6	4.56	128.6	2.28	92.6	4.14	168.5	336
低肥区 ^②	8.7	1.05	56.7	1.17	38.5	2.08	78.6	227

①High fertility; ②Low fertility

1.2 试验方法

本试验是在农田生态系统下进行,于小麦拔节期和扬花期分别在高肥区和低肥区各选 4 个测试点,进行土壤、植物、大气的温度、水势和含水量等定时观测,观测时间为 2、6、10、14、18、22h,各项观测值取平均值。其中土壤温度和水势用地温计和水银张力计^[10]插入土壤 10cm 处测定。小麦叶水势和温度用植物水势测定仪——压力室^[7]和水银温度计测定,叶片组织水测定用马林契克法^[7];冬小麦群体中大气相对湿度用湿度计在小麦群体中上部(群体高度三分之二处)测定,大气温度在小麦群体以上 50cm 处大气中测定。大气水势计算公式为 $\Psi_A = RT/V \cdot \ln(P/P^0)$,其中 P/P^0 为大气相对湿度, Ψ_A 大气水势, V 纯水偏摩尔体积。

1.3 SPAC 水分热力学函数计算^[2,3,5,8]

(1) 土壤水分热力学函数

$$\Delta\bar{G}_s = -V \cdot \tau$$

式中, $\Delta\bar{G}_s$ 为土壤水分相对偏摩尔自由能; τ 为土壤水吸力(水势的绝对值、张力计读数 mmHg)。

$$\Delta\bar{S}_s = V(\partial\tau/\partial T)$$

式中, $\Delta\bar{S}_s$ 为土壤水分相对偏摩尔熵; T 为绝对温度, $(\partial\tau/\partial T)$ 为 τ - T 线性方程斜率。

$$\Delta\bar{H}_s = \Delta\bar{G}_s + T \cdot \Delta\bar{S}_s$$

式中, $\Delta\bar{H}_s$ 为土壤水分相对偏摩尔焓。

(2)植物叶片水分热力学函数

$$\Delta\bar{G}_p = -V \cdot P$$

式中, $\Delta\bar{G}_p$ 为叶片水分相对偏摩尔自由能, P 为叶片水势测定仪-压力室测定读数。

$$\Delta\bar{S}_p = V(\partial P/\partial T)$$

式中, $\Delta\bar{S}_p$ 为叶片水分相对偏摩尔熵, $(\partial P/\partial T)$ 为 P - T 线性方程斜率。

$$\Delta\bar{H}_p = \Delta\bar{G}_p + T \cdot \Delta\bar{S}_p$$

式中, $\Delta\bar{H}_p$ 为叶片水分相对偏摩尔焓。

(3)大气水分热力学函数

$$\Delta\bar{G}_A = V \cdot \Psi_A$$

$$\Delta\bar{S}_A = -V(\partial\Psi/\partial T)$$

$$\Delta\bar{H}_A = \Delta\bar{G}_A + T \cdot \Delta\bar{S}_A$$

$\Delta\bar{G}_A, \Delta\bar{S}_A, \Delta\bar{H}_A$ 为大气水分相对偏摩尔自由能、熵、焓。

2 结果与讨论

2.1 土壤-植物-大气连续体系(SPAC)水分状态

在小麦拔节期和扬花期对供试农田生态系统 SPAC 温度、水势、含水量等进行 24h 昼夜定时观测, 结果如表 2 和表 3。表中显示温度对土壤水势具有显著影响, 在农田土壤含水量为 18.3% 左右时, 呈现随温度升高土壤水势增大的特点, 与前人研究结论相符^[2,6,9]。土壤温度与土水势关系曲线如图 1, 2 所示, 其进行线性拟合方程式为: 拔节期高肥区为 $\Psi_s = -83.83 + 1.06t_s (r = 0.9991)$, 低肥区为 $\Psi_s = -80.95 + 1.01t_s (r = 0.9827)$; 扬花期高肥区为 $\Psi_s = -82.07 + 0.93t_s (r = 0.9853)$, 低肥区为 $\Psi_s = -86.53 + 1.23t_s (r = 0.9966)$ 均达到显著正相关, 其水势温度效应 $(\partial\Psi/\partial t)$ 为正效应。与温度升高, 水的粘滞度和表面张力降低有关^[4,6]。因此土壤温度升高, 有助于土壤水分能量提高, 改善土壤水分的有效性。

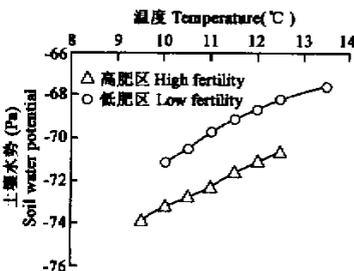


图 1 温度对土壤水势的影响(小麦拔节期)

Fig.1 Temperature conditions on water potential-gradient of soil (Jointing stage)

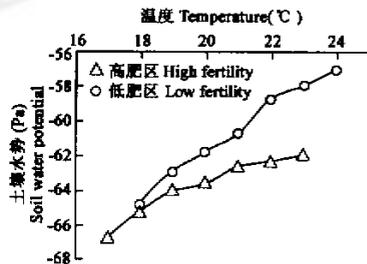


图 2 温度对土壤水势的影响(小麦扬花期)

Fig.2 Temperature conditions on water potential-gradient of soil (Flowering stage)

在农田生态系统中, 小麦叶水势随着气温升高而降低, 气温与叶水势进行线性拟合其方程式为: 拔节期高肥区为 $\Psi_p = 21 - 35.64t_A (r = -0.9981)$, 低肥区为 $\Psi_p = -113.72 - 34.92t_A (r = -0.9961)$; 扬花期高肥区为 $\Psi_p = 858.04 - 82.10t_A (r = -0.9978)$, 低肥区为 $\Psi_p = 821.34 - 77.02t_A (r = -0.9992)$ 都达

显著负相关,即其水势温度效应($\partial P/\partial t$)为负效应。小麦拔节期气温较低,叶水势随温度变化较小,其水势温度效应为 $-34.92\sim-35.64\text{Pa}/\text{C}$,绝对值较低;而扬花期气温较高,叶水势随温度变化剧烈,其水势温度效应为 $-77.02\sim-82.10\text{Pa}/\text{C}$,这是由于随气温升高大气蒸发力、叶片蒸腾作用增强,叶片组织含水量扬花期小于拔节期(表 2、3)所致,这与土壤含水量较低时,土壤水势温度效应较高的结论相对应^[6]。相应拔节期,高肥区、低肥区叶片组织含水量相近,其水势温度效应亦相近。而扬花期由于气温升高,加之高肥区冬小麦长势好,叶片蒸腾作用强,叶片组织含水量较低(表 3),水势温度效应较大。

表 2 冬小麦拔节期土壤-植物-大气连续系统(SPAC)水势、温度和含水量(4月12日)

Table 2 Water potential, temperature and water content of soil-plant-Atmosphere continuum (SPAC) during the wheat jointing

项目 Items	高肥区 High fertility						低肥区 Low fertility					
	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00	22:00	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00	22:00
t_s	10.0	9.0	9.5	11.5	12.5	11.0	11.0	10.0	10.5	12.5	13.5	12.0
ϕ_S	73.2	74.3	73.9	71.6	70.6	72.3	69.5	71.1	70.5	68.2	67.6	68.7
t_A	6.5	5.0	21.0	23.0	16.5	8.0	6.5	5.0	21.0	23.0	16.5	8.0
ϕ_P	296	236	817	865	674	378	326	287	828	905	737	393
t_B	6.0	5.0	20.0	28.0	15.0	8.0	6.0	5.0	20.0	28.0	15.0	8
ϕ_A	8590	7470	31320	57961	17060	9310	12780	11260	56140	63365	36420	16050
W_s	182.6	183.2	182.7	183.6	183.0	182.9	182.9	183.4	182.7	183.6	183.3	183.5
W_p	836.5	846.2	824.6	820.2	827.6	831.1	834.7	838.3	821.5	817.8	826.0	829.4

t_s 土壤温度 Soil temperature(C), ϕ_S 土壤水势 Soil water potential(-Pa), t_A 大气温度 Atmosphere temperature (C), ϕ_P 植物叶水势 Water potential of plant leaf(-Pa), t_B 湿度计干球温度 Dry ball temperature of hygrometer(C), ϕ_A 大气水势 Atmosphere water potential(-Pa), W_s 土壤含水量 Soil water content(g/kg), W_p 叶组织含水量 Leaf water content(g/kg), 以下符号单位相同 the same below

表 3 冬小麦扬花期土壤-植物-大气连续系统(SPAC)水势、温度和含水量(5月20日)

Table 3 Water potential, temperature and water content of soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) during the wheat flowering

项目 Items	高肥区 High fertility						低肥区 Low fertility					
	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00	22:00	2:00	6:00	10:00	14:00	18:00	22:00
t_s	18.0	17.0	19.0	21.0	23.0	20.0	19	18.0	20.0	22.0	24.0	21.0
ϕ_S	65.2	66.7	64.0	62.6	61.9	63.6	62.9	64.8	61.8	58.7	57.1	60.7
t_A	15.0	14.0	27.0	30.0	26.0	16.0	15.0	14.0	27.0	30.0	26.0	16.0
ϕ_P	360	300	1340	1660	1220	480	310	270	1260	1510	1150	430
t_B	15.0	14.0	30.0	32.0	29.0	16.0	15.0	14.0	30.0	32.0	29.0	16.0
ϕ_A	11108	10810	45320	62106	37720	13063	12370	11270	45630	78440	37950	13630
W_s	183.8	183.2	183.4	182.9	183.6	183.0	182.8	183.1	183.4	182.9	183.3	183.5
W_p	754.2	788.3	731.4	720.1	725.3	742.0	774.0	799.1	738.4	721.8	734.9	754.3

农田小麦群体内,随气温升高,大气水势降低,这与随气温升高,大气干燥度增大,空气流动性增强,水分散失增快有关。小麦拔节期,高肥区与低肥区小麦群体内大气水势相差较大,高肥区小麦长势好,覆盖度大,行间蒸发强度小,群体内大气流动性弱,因而群体内大气相对湿度较大,大气水势较高。扬花期,小麦已生长达 90cm 左右,高、低肥区小麦复盖度差异缩小,所以高、低肥区小麦群体大气相对湿度差异缩小,大气水势趋于相近^[2]。

此外由表 4 可知,无论在小麦拔节期还是扬花期,随着气温升高,土壤与植物间水势差($\Psi_{s-p}=\Psi_s-\Psi_p$)及植物与大气间水势差($\Psi_{p-a}=\Psi_p-\Psi_a$)均显著增大。这是由于随温度升高,土壤水势增高,而植物叶片水势、大气水势显著降低所致。

2.2 不同肥力区农田生态条件 SPAC 水分状态及能量特征

表 4 温度对 SPAC 水势差的影响

Table 4 Effect of temperature conditions on water potential gradient of SPAC

项目 Item	拔节期 Jointing stage				扬花期 Flowering stage			
	高肥区 High fertility		低肥区 Low fertility		高肥区 High fertility		低肥区 Low fertility	
s	6:00	14:00	6:00	14:00	6:00	14:00	6:00	14:00
Ψ_S	74.3	71.6	71.1	68.2	66.7	62.6	64.8	58.7
Ψ_P	236	865	287	905	300	1660	270	1510
Ψ_A	7590	57961	12780	63365	10810	62106	11270	78440
Ψ_{S-P}	161.7	793.4	215.9	836.1	233.3	1597.4	205.2	1453.3
Ψ_{P-A}	7354	57096	12493	62460	10510	60446	11000	76930

$$\Psi_{S-P} = \Psi_S - \Psi_P; \Psi_{P-A} = \Psi_P - \Psi_A$$

本文采用相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)、焓($\Delta\bar{H}$)、熵($\Delta\bar{S}$)3种热力学函数表征 SPAC 水分状态及能量特征。相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)反映水分有效能量高低;相对偏摩尔焓($\Delta\bar{H}$)表示水分以热的形式表现出的总能量变化;相对偏摩尔熵($\Delta\bar{S}$)反映水分子存在状态的有序程度。

2.2.1 农田生态条件 SPAC 水分热力学函数 由表 5~表 6 三种热力学函数表现的规律看,不论高、低肥区冬小麦在不同生长发育时期均显示:水分的相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)为土壤>植物>大气,即土壤水分自由能最高,植物次之,大气最低。以低肥区为例,土壤水 $\Delta\bar{G}$ 为植物水 $\Delta\bar{G}$ 的 4~26 倍,为大气水 $\Delta\bar{G}$ 的 927~1332 倍,这与表 2 中 SPAC 水势大小顺序相同;水分相对偏摩尔焓($\Delta\bar{H}$)及熵($\Delta\bar{S}$)为大气>植物>土壤,仍以低肥区为例,大气水 $\Delta\bar{S}$ 分别比植物和土壤水 $\Delta\bar{S}$ 大 36~63 倍和 2213~3064 倍;大气水的 $\Delta\bar{H}$ 分别比植物和土壤水的 $\Delta\bar{H}$ 高出 174.86~440.75J/k·mol 和 13473.5~15144.8J/k·mol。这与在人工气候室中控温控湿条件下所得 SPAC 水分 $\Delta\bar{S}$ 、 $\Delta\bar{H}$ 为大气>土壤>植物^[3,5]有所不同,表明在田间自然蒸腾条件下,气态水分子混乱度最大,有序性最小,大气水分仍具有最大的总能量,而小麦叶片水分子的混乱度和总能量则超过土壤水分,这显然与田间条件下,小麦叶片水分受温度和蒸腾作用导致的变异较大有关。同一肥力水平和相近土壤含水量条件下(表 2,表 3),小麦不同生育期土壤水 $\Delta\bar{G}$ 为拔节期<扬花期。例如,高肥区,拔节期 6:00h 土壤水分 $\Delta\bar{G} = -1.34\text{J/mol}$,扬花期 6:00 土壤水分 $\Delta\bar{G} = -1.20\text{J/mol}$ 。这是由于在同一土壤含水量(18.3%)时,扬花期土壤温度高,土壤水势的温度正效应作用所致。而植物叶片和大气水分的偏摩尔自由能均为拔节期(扬花期,这与植物叶片和大气水势温度负效应相吻合。

表 5 SPAC 水分热力学函数(拔节期)

Table 5 Thermodynamics parameters of moisture in SPAC (Jointing Stage)

肥力 Fertility	时间 Time(h)	土壤 Soil			植物 Plant			大气 Atmosphere		
		$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$
高肥区 High fertility	2	-1.32		-6.73	-5.33		174.11	-152.46		12582.85
	6	-1.34		-6.72	-4.25		174.23	-136.62		12466.65
	10	-1.33	-0.019	-6.73	-14.71	0.642	174.04	-563.76	45.311	12712.36
	14	-1.29		-6.71	-15.57		174.46	-1043.3		12368.76
	18	-1.27		-6.70	-12.13		173.73	-307.08		12742.49
	22	-1.30		-6.75	-6.80		173.68	-167.58		12474.19
低肥区 Low fertility	2	-1.25		-6.42	-5.87		169.94	-239.22		15197.18
	6	-1.28		-6.43	-5.17		169.69	-230.04		15151.23
	10	-1.27	-0.018	-6.43	-14.90	0.629	170.03	-1010.52	55.13	15252.83
	14	-1.23		-6.42	-16.29		169.89	-1140.57		15177.91
	18	-1.22		-6.43	-13.27		168.83	-655.56		15387.27
	22	-1.24		-6.43	-7.07		169.68	-288.90		15202.03

$\Delta\bar{G}$ 、 $\Delta\bar{S}$ 和 $\Delta\bar{H}$ 的单位分别是 J/mol、J/mol·k 和 J/mol(下面表中相同)

2.2.2 不同肥力数据对 SPAC 水分 $\Delta\bar{G}$ 的影响 土壤、植物、大气水分相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)与水分运动及其有效性密切相关,研究农田生态条件不同肥力对 SPAC 水分 $\Delta\bar{G}$ 的影响具有重要意义,本文侧重探

表 6 SPAC 水分热力学函数(扬花期)

Table 6 Thermodynamics parameters of moisture in SPAC (Flowering stage)

肥力 Fertility	时间 Time(h)	土壤 Soil			植物 Plant			大气 Atmosphere		
		$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$	$\Delta\bar{G}$	$\Delta\bar{S}$	$\Delta\bar{H}$
高肥区 High fertility	2	-1.17		-6.03	-6.48		419.76	-199.94		12567.10
	6	-1.20		-6.04	-5.40		419.36	-194.58		12528.21
	10	-1.15	-0.017	-6.03	-24.12	1.48	419.88	-815.76	44.33	12483.24
	14	-1.13		-6.04	-29.88		418.56	-1117.9		12402.74
	18	-1.11		-6.04	-21.96		420.56	-678.96		12708.70
	22	-1.14		-6.02	-8.64		419.08	-235.13		12576.24
低肥区 Low fertility	2	-1.13		-7.58	-5.58		388.98	-222.66		13794.30
	6	-1.17		-7.60	-4.86		388.33	-202.86		13765.43
	10	-1.11	-0.022	-7.59	-22.68	1.37	388.32	-821.34	48.67	13925.67
	14	-1.06		-7.60	-27.18		387.93	-1411.9		13432.43
	18	-1.04		-7.60	-20.70		388.93	-683.10		14015.24
	22	-1.09		-7.59	-7.74		388.19	-245.34		13820.29

讨论不同土壤肥力对 SPAC 水分 $\Delta\bar{G}$ 的影响。由表 5、表 6 可见,农田生态条件下,在冬小麦拔节期及扬花期,低肥区、高肥区土壤水分近于相等情况下(表 2、表 3),各测定时间土壤水分相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$)皆为高肥区<低肥区,这是由于各测定时间低肥区土壤温度均比高肥区较高(表 2、表 3),土壤水势温度正效应作用所致。植物水分相对偏摩尔自由能($\Delta\bar{G}$),拔节期为高肥区>低肥区,扬花期相反为高肥区<低肥区,这与小麦叶片组织含水量,拔节期高肥区略高,扬花期高肥区较低相对应(表 2、表 3),显示小麦叶片组织含水量对叶片水分 $\Delta\bar{G}$ 的大小起主导作用。拔节期高肥区小麦叶片组织含水量略高,与该区小麦长势较好,且拔节期气温较低,作物蒸腾较弱有关;扬花期由于高肥区小麦长势好,而气温增高,作物蒸腾加剧,导致叶片组织含水量降低较快。冬小麦两个生育期群体内大气水分的 $\Delta\bar{G}$ 均为高肥区>低肥区,这是由于高肥区冬小麦生长旺盛,覆盖度大,小麦群体内大气相对湿度高所致。

2.2.3 不同肥力水平 SPAC 水分 $\Delta\bar{G}$ 差值关系 土壤-植物-大气连续系统中水分流动的推动力是水势(水分能量)梯度,在该体系中各过程间水分流速与其水势梯度成正比^[11],增大作物与土壤间的水势差,便于加强作物吸水能力和减少水气向大气中的散失^[12]。因此研究 SPAC 各过程间水分能量差对探讨系统中水分运移状态具有重要作用。由表 7 可见,土壤-植物间水分 $\Delta\bar{G}$ 差值($\Delta\bar{G}_{S-P}$ =土壤水 $\Delta\bar{G}_S$ -植物水 $\Delta\bar{G}_P$)及植物-大气间水分 $\Delta\bar{G}$ 差值($\Delta\bar{G}_{P-A}$ =植物水 $\Delta\bar{G}_P$ -大气水 $\Delta\bar{G}_A$),在小麦拔节期均为高肥区小于低肥区。

表 7 不同肥力水平对 SPAC 水分 $\Delta\bar{G}_{S-P}$ 及 $\Delta\bar{G}_{P-A}$ 的影响Table 7 Effect of different fertility conditions on $\Delta\bar{G}_{S-P}$ and $\Delta\bar{G}_{P-A}$ of moisture in SPAC

生育期	肥力 Fertility	时间 Time(h)	$\Delta\bar{G}_S$	$\Delta\bar{G}_P$	$\Delta\bar{G}_A$	$(\Delta\bar{G}_S - \Delta\bar{G}_P)$	$(\Delta\bar{G}_P - \Delta\bar{G}_A)$
拔节期 Jointing stage	高肥区	6	-1.34	-4.25	-136.62	2.91	132.37
	High	14	-1.29	-15.57	-1043.38	14.28	1027.73
	fertility	18	-1.27	-12.13	-307.08	10.86	294.95
	低肥区	6	-1.28	-5.17	-230.04	3.89	224.87
	Low	14	-1.22	-16.29	-1140.57	15.07	1124.28
	fertility	18	-1.21	-13.27	-655.56	12.06	642.29
扬花期 Flowering stage	高肥区	6	-1.20	-5.40	-194.58	4.20	189.18
	High	14	-1.13	-29.88	-1117.91	28.75	1088.03
	fertility	18	-1.11	-21.96	-678.96	20.85	657.00
	低肥区	6	-1.17	-4.86	-202.86	3.69	198.00
	Low	14	-1.06	-27.18	-1411.92	26.12	1384.74
	fertility	18	-1.04	-20.70	-683.10	19.66	662.40

显示在拔节期高肥区土壤水分由土壤经植物到大气的运移趋势较弱,为高肥区土壤蓄水及小麦生长后期供水创造了良好条件,相反低肥区土壤水分运移损耗较大;小麦扬花期水分 $\Delta\bar{G}_{S-p}$ 是高肥区大于低肥区,而水分 $\Delta\bar{G}_{p-A}$ 高肥区则小于低肥区,运移损耗较大;小麦扬花期水分 $\Delta\bar{G}_{S-p}$ 是高肥区大于低肥区,而水分 $\Delta\bar{G}_{p-A}$ 高肥区则小于低肥区,表明小麦扬花期高肥区土壤-植物间水分运移趋势较强,而植物-大气间水分运移、散失趋势较弱。此时期正是小麦生长需水临界期,显然高肥区水分状态,有利于小麦扬花和幼穗分化,是小麦获得高产丰收关键。这也是农田生态条件下较高肥力土壤可调控 SPAC 水分状态,使有限水分用于小麦生长发育的关键时期,形成高产的原因。

参考文献

- [1] Zhang J C(张君常), Adoption of energy concept study soil and soil biology. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences* (in Chinese) (陕西农业科学), 1980, (6):12~16.
- [2] Gao J F(高俊凤), Bai J L(白锦麟), Zhang Y P(张一平), *et al.* Properties of thermodynamic functions and effects of temperature of water regimes in SPAC under different water regime. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis* (in Chinese) (西北农业大学学报), 1990, **18**(4):51~55.
- [3] Lu J L(吕家珑), Zhang Y P(张一平), Liu S C(刘思春), *et al.* Effect of phosphate fertilizer application level on SPAC moisture energy characters. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 2000, **20**(2):255~263.
- [4] Zhu Z X(朱祖祥). Concept of soil moisture energy and its significance. *Progress in Soil Science* (in Chinese) (土壤学进展), 1979, (1):1~21.
- [5] Liu S C(刘思春), Lu J L(吕家珑), Zhang Y P(张一平), *et al.* Study on relationship of water movement and thermodynamic function in unsaturated soil. *Acta Pedologica Sinica* (in Chinese) (土壤学报), 2000, **37**(3):388~395.
- [6] Zhang Y P(张一平), Bai J L(白锦麟), Zhang J C(张君常), *et al.* Effect of soil temperature on soil water potential. *Acta Pedologica Sinica* (in Chinese) (土壤学报), 1990, **27**(3):454~458.
- [7] Department of plant physiology and biochemistry of Northwestern Agricultural University (西北农业大学植物生理生化教研室编). Guide of plant physiology experiment(in Chinese). Xi'an: Shaanxi science and technology press, 1987. 7~8. 19~22, 28.
- [8] Zhang J C(张君常). A preliminary discussion on the functions of thermodynamics in the balance of movement of energy of water in space. *Acta collegii septentrional-occidentali agriculturae* (in Chinese) (西北农学院学报), 1983, (3):1~18.
- [9] Kolaian J H and Low P F. Thermodynamic properties of water in suspensions of montmorillonite. *Clays and minerals*. 1962, **9**:71~84.
- [10] Hopmems J W, Dane J H. Effect of temperature-dependent hydraulic properties on Soil water movement. *Soil Sci. Soc, Am, J.*, 1985, **49**:51~58.
- [11] Hua M(华孟), Wang J(王坚). *Soil Physics Fourth Edition*(in Chinese). Beijing agriculture university press, 1993. 137~144.
- [12] Tao Y F(陶毓汾), Wang L X(王立祥), Han S F(韩仕峰), *et al.* Water potential and development in north drought region in China(in Chinese), Beijing: Atmosphere press, 1993. 51.
- [13] Shao M A(邵明安), Chen Z X(陈志雄). Water movement in SPAC. *Memoir of northwestern institute of soil and water conservation, academia and ministry of water conservancy* (in Chinese) (中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊), 1991, **13**:3~12