

冷型小麦灌浆期农田土壤热通量的分析^{*}

许秀娟, 张嵩午

(西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 根据农田土壤温度资料, 分析了冷型小麦陕 229 和对照品种 9430 的土壤温度, 用热平衡台站规范方法计算了土壤热通量。结果表明, 在灌浆期冷型小麦陕 229 比 9430 品种 0~0.20 m 土温偏低 0.2~3.5 °C (8:00 和 20:00 地面温度除外), 偏低值以午后最大, 地面达 2.5~3.5 °C, 地下 0.05, 0.10, 0.15 和 0.20 m 分别达 1.5~2.2, 0.9~1.6, 0.7~1.5 和 0.6~1.5 °C。通过地面的土壤热通量陕 229 比 9430 偏低 10.80~13.24 J/(m²·s), 0~0.20 m 土层的热含量偏低 11.02~13.67 J/(m²·s), 即冷型小麦的 0~0.20 m 土壤环境具有偏冷的特征。

[关键词] 冷型小麦; 土壤温度; 土壤热通量

[中图分类号] S152.8; S512.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-2782(2001)05-070-05

在“土壤—作物—大气”系统中, 土壤和大气是作物赖以生存的自然环境。土壤和大气热状况直接影响着作物的生长发育及产量形成, 同时, 不同基因型的小麦由于其生理特性和群体结构的差异也在一定程度上影响环境的热状况。

以往土壤热通量的研究主要集中于农田与裸地、同一作物不同生育期以及不同材料的覆盖地等方面^[1~5], 对同一作物不同品种间土壤热通量的研究尚未见报道。有研究^[6]表明, 冷型小麦灌浆期的株间环境具有冷湿的特征, 有利于抗御该生育期的干热环境胁迫。本研究根据冷型小麦陕 229 和对照品种 9430 的土壤温度资料, 进一步分析研究了冷型小麦灌浆期农田土壤温度和土壤热通量。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地设在西北农林科技大学农作一站, 该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬, 属暖温带半湿润气候的黄淮平原冬麦区。

参试品种有陕 229, 9430, 小偃 6 号, 9405, RB₆ 和偃师 9 号等 6 个, 每个品种分 3 个密度 (120, 240, 360 万株/hm²) 共 18 个处理, 随机区组排列, 重复 3 次。全部品种于 1999-10-09 播种。

1.2 观测记载

在陕 229 和 9430 品种小区 (240 万株/hm²) 的

行间安装地面温度表和曲管地温表, 两小区安装地温表的方位一致。其中 05-18 8:00~20:00 每 3 h 观测 1 次土壤温度。05-16~20 8:00~20:00 每 6 h 观测 1 次土壤温度。同时测定空气温度和湿度、光照度及风速等。测温、湿度和光照的仪器分别为阿斯曼通风干湿表和 CZ-4 型照度计, 用往返重复读数法观测。风速用热球式电风速计测定, 1 min 读 20 次风速取平均值。于每次气温、湿度等小气候观测的开始和结束时, 在陕 229 和 9430 小区同时观测土壤温度。用烘干法测定土壤湿度。

同时记载小麦物候期, 测定各小区植株叶片衰老进程, 收获时取样分析小麦产量等资料。

2 结果与分析

2.1 冷型小麦灌浆期农田土温

在气候、土壤背景相同且栽培措施完全一致的小尺度范围内, 冷型小麦品种的冠层温度在灌浆期具有持续偏低的特征, 且株间的环境气温同样具有偏低的特征^[6]。但是, 其农田的土壤温度是否也具有偏低的特征呢? 笔者在 240 万株/hm² 密度处理中相邻的陕 229 和 9430 小区测定了 0~0.20 m 土壤温度。

图 1 为 2000-05-18 测定的 0~0.20 m 土温垂直分布图。

^{*} [收稿日期] 2000-12-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (39870477)

[作者简介] 许秀娟 (1943-), 女, 上海市人, 副教授。主要从事农业气象研究。

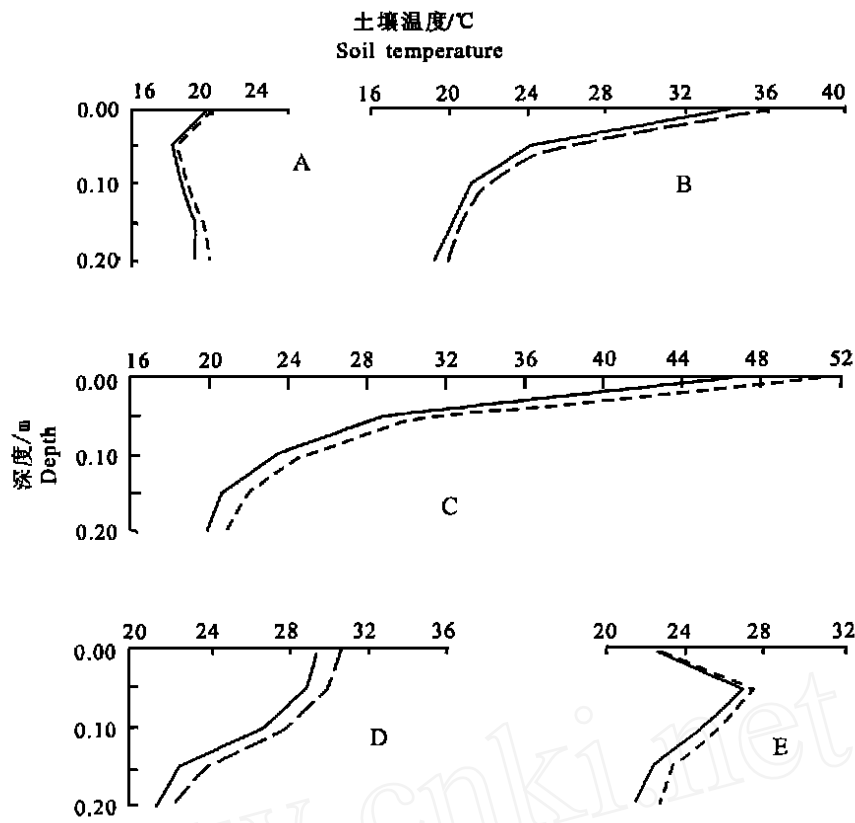


图 1 2000-05-18 试验田土壤温度垂直分布图

——陕 229; ----9430 A: 8: 00; B: 11: 00; C: 14: 00; D: 17: 00; E: 20: 00

Fig 1 Vertical distribution chart of soil temperature at agricultural experiment staion on May 18 2000

——Shaan 229; ----9430 A: 8: 00; B: 11: 00; C: 14: 00; D: 17: 00; E: 20: 00

由图 1 可见, 8: 00 土温的垂直分布为清晨转变型, 其中, 0.05~0.20 m 是辐射型分布, 热量由下层向上层传导, 但地面已因太阳辐射加热而增温, 使 0~0.05 m 土壤温度成为日射型分布。8: 00 后, 太阳辐射不断加强, 地面温度不断上升, 热量由上层向下层传递, 使 11: 00, 14: 00, 17: 00 土壤温度呈日射型分布。由于不同时间地面得到的辐射能量强度不同, 致使土温垂直分布曲线存在差异。20: 00 0.05~0.20 m 土壤温度仍保持日射型分布, 但由于日落后

地面冷却降温, 使 0~0.05 m 土壤温度呈辐射型分布。尽管各时土壤温度垂直分布型不同, 但除了 8: 00 和 20: 00 地面温度相同外, 其余时间陕 229 的土壤温度均比 9430 品种偏低。其土温差以 14: 00 最大, 达 1.0~3.2 °C, 并随深度增加而减少; 8: 00 陕 229 和 9430 的土温差最小, 仅为 0.2~0.8 °C, 并随深度增加而略增, 其他时间陕 229 和 9430 的土温差介于 8: 00 和 14: 00 之间。

表 1 灌浆期农田土壤温度

Table 1 Soil temperature during the filling stage °C

深度/m Depth	05-09 May 9		05-13 May 13		05-16 May 16		05-20 May 20		05-24 May 24		05-30 May 30	
	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan
0	30.5	-2.8	34.5	-3.0	52.5	-3.2	57.0	-3.5	50.2	-3.5	46.5	-2.5
0.05	27.6	-1.5	25.6	-1.5	27.4	-1.4	32.5	-2.0	30.0	-2.2	28.9	-1.3
0.10	20.5	-0.9	21.5	-1.1	21.0	-1.3	24.0	-1.5	24.5	-1.6	23.5	-1.0
0.15	18.7	-0.7	20.0	-0.8	19.2	-0.9	22.0	-1.5	22.5	-1.5	21.5	-0.9
0.20	17.6	-0.6	19.0	-0.8	18.1	-0.9	21.0	-1.5	21.8	-1.5	20.5	-0.8

注: 1. 表中陕 229 的数值是陕 229 与 9430 的差值; 2. 05-09, 05-13, 05-30 土壤温度是 15: 00 所测, 05-16, 05-20, 05-24 是 14: 00 所测。

Notes: 1. Data value of Shaan 229 is the difference of soil temperature between Shaan 229 and 9430; 2. Soil temperatures on May 9, 13, 30 are measured at 15 O'clock, and soil temperatures on May 16, 20, 24 are measured at 14 O'clock

在灌浆期的其他时间,不论是晴天还是多云,陕 229 与 9430 相比,农田土壤温度均存在偏低现象,晴天午后地面温度的最大差值可达 3.5°C , 0.05 m 处达 2.2°C , 0.10 m 处达 1.6°C , $0.15\sim 0.20\text{ m}$ 处达 1.5°C 。一般来说,温度偏低值随生育期推迟而增大,如 05-09 仅为 $0.6\sim 3.0^{\circ}\text{C}$,而 05-24 达 $1.5\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ 。05-30 虽受前期降水的影响,土壤温度明显下降,但差值仍达 $0.8\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ (表 1)。

2.2 冷型小麦灌浆期农田土壤热通量

为了分析冷型小麦农田土壤温度偏低的原因,笔者计算了 05-16, 05-18 和 05-20 8:00~14:00 0~ 0.20 m 土层的平均土壤热通量。由于从 8:00~12:00(地方时)太阳辐射逐步加强,地面得到的热量不断增加,土壤温度随时间和空间而变化,因此土壤加热是非稳态热传导过程。非稳态热传导方程(热传导第二定律)^[7]为

$$C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

式中, C_v 和 λ 分别是土壤的容积热容量和导热率; ∇ 是温度 T 的三维梯度。

仅考虑垂直方向热传导时,采用一维形式

$$C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2)$$

令 K 为导热率,在不考虑容积热容量、导热率和导热率随土壤深度变化的情况下,热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3)$$

对式(3)进行时间($t_1 \sim t_2$)和深度($0 \sim H$)积分,并用 $0 \sim 0.20\text{ m}$ 的土温资料计算通过地面的土壤热通量是我国热平衡台站的规范方法,简称规范法^[1]。它由拉依哈特曼 ДЛ(Лайхтман ДЛ)提出,采金 ГХ(Гайден ГХ)近似化简而建立起来的。

拉依哈特曼 ДЛ假定($t_1 \sim t_2$)时段内容积热容量 C_v 不随时间变化,对式(3)左右各乘以 $C_v(z-H)dz dt$,并对时间、深度积分得到计算 $t_1 \sim t_2$ 时段 $0 \sim H$ 土层中土壤热通量 B 的表达式为

$$\int_0^H B dz = \frac{C_v}{H} \int_0^H [T(z, t_2) - T(z, t_1)] (H - z) dz - \frac{C_v K}{H} \int_0^H [T(H, t) - T(0, t)] dt \quad (4)$$

经采金 ГХ改变后,采用分层计算($0 \sim h$)和($h \sim H$)的热通量,式(4)变为

$$\int_0^H B dz = C_v \int_0^H [T(z, t_2) - T(z, t_1)] m(z) dz - \frac{C_v K}{H - h} \int_0^H [T(H, t) - T(h, t)] dt \quad (5)$$

$$\text{式中, } m(z) = \begin{cases} 1 & 0 \leq z \leq h \\ \frac{H-z}{H-h} & h \leq z \leq H \end{cases}$$

对于热平衡台站,用地面温度表和曲管地温表观测土温,因此,在热平衡观测规范中规定: $h = 0.10\text{ m}$, $H = 0.20\text{ m}$, $\Delta t = t_2 - t_1$ 。则 $t_1 \sim t_2$ 时段平均土壤热通量 $\bar{B}$ 的近似计算式(即热平衡台站规范法)为

$$\bar{B} = \frac{C_v}{\Delta t} (S_1 - \frac{K}{10} S_2) \quad (6)$$

式中, $\frac{C_v}{\Delta t} S_1$ 表示 $0 \sim 0.20\text{ m}$ 土层的平均热含量变化; $-\frac{1}{\Delta t} C_v \cdot K \cdot \frac{S_2}{10}$ 表示通过 0.20 m 的平均热通量; C_v 是土壤容积热容量; K 是日平均导热率; $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

$$S_1 = 20(0.082\Delta T_0 + 0.333\Delta T_5 + 0.175\Delta T_{10} + 0.156\Delta T_{15} + 0.004\Delta T_{20}) \quad (10^{-2}^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}) \quad (7)$$

其中 $\Delta T_0, \Delta T_5, \Delta T_{10}, \Delta T_{15}, \Delta T_{20}$ 分别是 $0, 0.05, 0.10, 0.15$ 和 0.20 m 深度处 t_2 与 t_1 时的土温差。

$$S_2 = \frac{\Delta T}{2} [T(0.20, t_1) - T(0.10, t_1) + T(0.20, t_2) - T(0.10, t_2)] \quad (^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}) \quad (8)$$

式中, $T(0.20, t_1)$ 和 $T(0.10, t_1)$ 分别是 t_1 时间 0.20 和 0.10 m 的土温; $T(0.20, t_2)$ 和 $T(0.10, t_2)$ 分别是 t_2 时间 0.20 和 0.10 m 的土温。

把 05-16, 05-18 和 05-20 0~ 0.20 m 土温资料代入式(7)和式(8)计算 S_1 和 S_2 。

土壤容积热容量 C_v 的计算式^[7]为

$$C_v = C_m f_m + C_o f_o + c_w f_w \quad (9)$$

式中, C_m, C_o, C_w 分别是土壤中矿物质、有机质和水的容积热容量,其值分别取 $1.93, 2.51$ 和 $4.19\text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ^[8]。 f_m, f_o 和 f_w 分别是土壤中矿物质、有机质和水的容积份数。

05-19 在陕 229 和 9430 试验田测定 $0 \sim 0.20\text{ m}$ 平均土壤湿度分别为 109.2 和 102.4 g/kg , 土壤的容重、孔隙度和有机质含量分别取 1.31 g/cm^3 , 51% 和 11.72 g/kg ^[9], 代入式(9), 计算得到陕 229

和 9430 试验田土壤的容积热容量 C_v 分别为 1.55×10^6 和 $1.51 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

日平均导温率 K 的计算式^[1]为

$$K = \frac{26.67(Q_{0.06}\Delta T_0 + \Delta T_5 + 1.62\Delta T_{10} + \Delta T_{15} + Q_{0.06}\Delta T_{20})/6(\frac{D_8 + D_{20}}{2} + D_{11} + D_{14} + D_{17})}{(10)}$$

式中, $\Delta T_0, \Delta T_5, \Delta T_{10}, \Delta T_{15}, \Delta T_{20}$ 是各深度 20: 00 与 8: 00 的土温差; $D_8, D_{11}, D_{14}, D_{17}, D_{20}$ 表示各时土温分布的特征量, 有

$$D = \frac{T_0 + T_{20}}{2} - T_{10} \quad (11)$$

其中, T_0, T_{10}, T_{20} 为各时次 0, 10, 20 m 的土温。
根据 05-18 的土温观测资料, 由式(10)和(11)计算得到陕 229 和 9430 品种的农田土壤日平均导温率 K 分别为 19.68 和 $19.34 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

由于从 05-12~ 05-27 均无降水, 土壤湿度变化较小, 因此把 05-18 的日平均导温率和 05-19 的容积热容量近似作为 05-16~ 05-20 的导温率和容积热容量。最后, 把 C_v, K, S_1, S_2 代入式(6)计算得该 3 d 8: 00~ 14: 00 的土壤平均热通量, 结果列于表 2。

表 2 灌浆期农田平均土壤热通量

Table 2 Mean heat flux of soil during filling stage						$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
日期(月-日) Date (M-D)	0~ 0.20 m 热含量 Heat energy between 0~ 0.20 m		通过 0.20 m 的热通量 Heat flux past 0.20 m		通过地面的热通量 Heat flux past surface	
	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229
05-16	116.15	105.13	1.61	1.83	117.76	106.96
05-18	112.29	99.05	3.50	3.66	115.79	102.71
05-20	118.65	104.98	2.92	3.35	121.57	108.33

由表 2 可见, 在相同天气条件下的同一时刻, 由于品种不同, 农田中用于加热土壤的热通量存在一定的差异。相对而言, 通过地面的土壤热通量陕 229 (冷型小麦) 比 9430 偏低 $10.80 \sim 13.24 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。同时, 0~ 0.20 m 土层的平均热含量和通过 0.20 m 的平均热通量也有差异, 对于前者陕 229 比 9430 偏低 $11.02 \sim 13.67 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而后者陕 229 比 9430 偏高 $0.16 \sim 0.43 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。显然, 0~ 0.20 m 土层平均热含量较小的主要原因是 0~ 0.20 m 土壤温度偏低。

3 结论和讨论

1) 冷型小麦在灌浆期不仅具有冠层体温和冠层顶及其以下的各高度株间气温偏低、株间湿度偏高的特征, 而且也具有地面至地下 0.20 m 的浅层土温偏低的特征。显然, 该特征对抗御北方冬麦区该生育期的干热环境胁迫、延缓衰老和增加粒重十分有利, 因此利用冷型小麦的有利基因作为育种材料, 有可能培育出高产、稳产和抗干热风的新品种。

表 3 灌浆期农田光照度

Table 3 Illuminance of field during filling stage										klx
高度 Height	05-09 May 9		05-13 May 13		05-16 May 16		05-20 May 20		05-30 May 30	
	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229	9430	陕 229 Shaan 229
冠顶 Plant top	67.5	- 0.5	55.0	- 0.6	80.6	- 0.8	80.5	- 1.0	76.8	- 0.3
株高 2/3 2/3 plant height	63.0	- 3.0	53.0	- 2.5	78.5	- 1.2	79.5	- 1.8	73.5	- 1.5
0.20 m	46.3	- 4.8	40.3	- 5.3	44.0	- 3.8	58.0	- 5.0	60.0	- 3.7
0.05 m	22.5	- 4.9	29.0	- 6.8	34.5	- 4.0	46.5	- 6.0	46.1	- 4.3

注: 表中陕 229 的数值是陕 229 与 9430 的差值。
Note: Data value of shaan 229 is a difference of illum inance between Shaan 229 and 9430

2) 灌浆期陕 229 麦田土壤热通量比 9430 (常规品种) 偏小, 可能与其上三叶功能期长有关。据 05-15 观测, 9430 品种的倒一、二、三叶黄叶面积百分率分别已达 12%, 44% 和 83%, 但是陕 229 品种的倒

一、二叶均为绿色,仅倒三叶有 15% 变黄。由于较多绿叶的遮挡,使到达地面的太阳辐射量减少。笔者所测的光照度资料表明,陕 229 株间光照度比 9430 偏小,差值由冠顶自上而下增加(表 3)。据研究^[4],5~6 月晴天中午前后,1 klx 的光照度对应太阳总辐射

是 $8.3 \sim 9.7 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由此可见,陕 229 品种较多的绿叶不仅使潜热通量增大^[6],而且减少了到达地面的太阳辐射能量,从而造成农田土壤热通量和温度偏低。

[参考文献]

- [1] 翁笃鸣,陈万隆,沈觉成,等. 小气候和农田小气候[M]. 北京: 农业出版社, 1979.
- [2] Rosenberg N. J. Microclimate: The biological environment[M]. New York: John Wiley & sons, 1983.
- [3] 董振国. 冬小麦土壤热通量变化特征及计算方法[J]. 农业气象, 1986, (1): 23- 27.
- [4] 董振国, 于沪宁著. 农田作物层环境生态[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1994.
- [5] 朱自玺, 方文松, 赵国强. 麦秸和残茬覆盖对夏玉米农田小气候的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, (2): 19~ 24.
- [6] 许秀娟, 张嵩午. 冷型小麦灌浆期株间温、湿度的分析[J]. 西北农业大学学报, 2000, (6): 53- 57.
- [7] 希勒尔 D. 土壤物理学概论[M]. 尉庆丰, 荆家海, 王益权, 译. 西安: 陕西人民教育出版社, 1988.
- [8] 马耀华, 刘树庆. 环境土壤学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [9] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

A study on soil heat flux of cold type wheat during filling stage

XU Xiu-juan, ZHANG Song-wu

(College of Life Sciences, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the observed data, this paper analyses soil temperature in the field of cold type wheat Shaan 229 and ordinary type wheat 9430. The soil heat flux of Shaan 229 and 9430 are calculated with standard method of heat balances meteorological station. The results show that the soil temperature of Shaan 229 is $0.2 \sim 3.5^\circ\text{C}$ lower than that of 9430 during filling stage (with the exception of soil surface temperature at eight o'clock and twenty o'clock). The maximum difference in soil temperature at 0 m, 0.05 m, 0.10 m, 0.15 m and 0.20 m are $2.5 \sim 3.5^\circ\text{C}$, $1.5 \sim 2.2^\circ\text{C}$, $0.9 \sim 1.6^\circ\text{C}$, $0.7 \sim 1.5^\circ\text{C}$ and $0.6 \sim 1.5^\circ\text{C}$ at 14- 15 o'clock respectively. The heat flux of surface of Shaan 229 is $10.80 \sim 13.24 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ lower than that of 9430. The soil heat energy of Shaan 229 between 0- 0.20 m is $11.02 \sim 13.67 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ lower than that of 9430. In other words, the soil environmental characteristics of the cold type wheat are cooler. This Characteristics are favorable to resist the dry-hot weather during filling stage of wheat.

Key words: cold type wheat; soil temperature; heat flux of soil

欢迎订阅 2002 年《西北林学院学报》

《西北林学院学报》是全国中文林业类核心期刊、全国高校优秀学报、陕西省优秀科技期刊。是由西北农林科技大学主办的以林业科学为主的综合性自然科学学术期刊。主要刊登国内外林业科学研究新成果、新动态。内容主要为林木遗传育种、林木培育、森林经营、经济林、水土保持、园林绿化与设计、森林资源及其保护、木材学及木材工业、林产化工、林业机械、林业经济等学科和有关基础理论学科方面的学术论文、研究报告、文献综述、试验简报、学术动态及林业新书简介等。

主要阅读对象: 农林高等院校师生、林业科技工作者及有关综合大学生物专业师生。

本刊为季刊, 季中月下旬出版, 大 16 开本, 每期 96 页, 每期定价 8.00 元, 全年 32.00 元。公开发行, 全国各地邮局(所)均可订阅, 邮发代号: 52- 99。国外发行委托中国教育图书进出口公司代理, 代号: JN SC-88。欢迎订阅, 欢迎投稿!

编辑部地址: 陕西 杨陵 西北农林科技大学西林校区

邮政编码: 712100 联系电话: (029) 7082059

