

西双版纳热带雨林干季林冠层雾露形成的小气候特征研究

刘文杰¹, 张克映¹, 王昌命², 李红梅¹, 段文平¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带雨林生态站, 云南省勐腊县勐仑 666303; 2. 西南林学院, 昆明 650224)

摘要: 对西双版纳热带雨林干季林冠层雾露形成的小气候特征进行了观测研究。结果表明, 雾露首先形成于最上林冠层, 林下露水的形成迟于林上 3~4h, 林下雾是由上层雾变浓、下沉而来。夜间, 雾形成前, 气温高于叶表温; 雾形成后, 气温则低于叶表温, 且气温及叶表温均有回升。雾露的形成不仅凝结了水汽进入森林, 同时也对森林起到了一定的保温作用, 这对热带雨林的生存和发展具有致关重要的作用。

关键词: 林冠层; 雾露水; 小气候特征; 热带雨林

The microclimate of dew and fog formation on canopy layer in the dry season in Xishuangbanna tropical rain forest

LIU Wen-Jie¹, ZHANG Ke-Ying¹, WANG Chang-Ming², LI Hong-Mei¹, DUAN Wen-Ping¹
(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Menglun, Yunnan 666303, China; 2. Southwest Forestry College, Kunming, 650224, China)

Abstract: The microclimatic characteristics of the dew and fog formation on canopy layer within a tropical rain forest, dominated by *Terminalia myriocarpa* in Xishuangbanna were measured in the dry-hot season. We investigated the net all-wave radiation, air humidity, vertical air temperature gradient, and maximum and minimum air, ground surface and leaf surface temperatures. The results indicated that in the night, the dew and fog occurred first on the top canopy layer, then the thickened fog penetrated into understory, and the formation time of the dew in the understory was 3~4 hours later than on the canopy layer. Before fog occurring the temperature was higher at 1.5m above the canopy than that on the leaf surface, and the temperature was lower after fog occurring. In the meantime the leaf surface temperature and air temperature were all rising after the fog occurring. The formation of the dew and fog not only condenses water vapour into the forest but also reduces the drop intensity of the temperature in the forest. This is of great ecological importance to the growth and development of the tropical rain forest.

Key words: canopy layer; dew and fog water; microclimatic characteristics; tropical rain forest

文章编号: 1000-0933(2001)03-0486-06 中图分类号: Q948 文献标识码: A

在世界一些多雾的地区, 当可记录的降水量成为植被生存的限制因子时, 植被却能正常生长, 其中雾露水(水平降水, "Horizontal" precipitation)扮演着极其重要的角色, 尤其是在弥补干季雨水不足方面具有重要的生态学意义^[1~5]。Bruijnzeel^[6]、Kerfoot^[7]和 Grubb^[8]认为, 雾露水是决定一些热带地区森林类型的非常重要的环境因子。雾露水作为热带森林生态系统的额外水分输入, 其生态效应是多方面的(如: 对森林生态系统水分、养分循环、环境因子调节等的影响)^[6, 9~13]。而林冠层作为森林与大气作用的强烈活动层, 则对

基金项目: 云南省应用基础研究基金(98C029Q)资助项目。

本研究得到马友鑫研究员、张一平研究员的指导, 曹敏研究员、刘玉洪高工、唐建维副研究员给予了很大帮助, 谨此一并致谢。

收稿日期: 1999-07-02; 修订日期: 1999-12-10

作者简介: 刘文杰(1969~), 男, 河南省封丘县人, 助理研究员。主要从事热带森林水文、小气候方面的研究。

雾露的形成及雾露水的截留起着决定性的作用。

西双版纳热带雨林是在水分、热量、海拔均达到极限条件下的热带北缘季节雨林群落, 由于地处山原地貌和季风气候特点的热带北缘, 热带雨林受到了季节干旱和冬季低温的影响^[14]。但西双版纳地区是有名的静风多雾区, 雾露塑造的湿温环境必定对热带雨林的生存和发展起着至关重要的作用。因此, 研究热带雨林林冠层雾露形成的小气候特征, 具有一定的理论和实际意义, 可为深入研究热带雨林生态系统水分、养分循环等规律提供参考。

1 样地自然环境及群落特征

观测点设在中国生态系统研究网络西双版纳热带雨林定位观测样地(热带雨林面积约 3km²)内(15° 56' N, 101° 15' E), 海拔 750m, 观测点与雨林边缘平坦区相对高差约 150m。本区属北热带西南季风气候, 一年中有干季(雾凉季 11~2 月份和干热季 3~4 月份)和雨季(5~10 月份)之分^[15]。年均气温 21.7℃, 相对湿度 86%, 年降雨量 1500~1600mm, 其中雨季占 83%~87%, 干季占 13%~17%。同时, 本区是有名的静风(年均风速 0.5m/s)多雾区, 无论山间或盆地, 辐射雾都频繁出现, 年雾日数 170d 左右, 最多年份达 240d, 主要出现在干季(占 80% 以上)。尤其是面积大于 1km² 的热带山地雨林覆盖区, 除部分阴雨天外, 几乎天天有浓雾重露出现。而在雨林砍伐迹地及小面积雨林覆盖区, 雾露出现的频度及强度相对降低^[16]。

群落上层优势种为番龙眼、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*), 中层主要树种有云南玉蕊、大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)等, 下层主要树种有细罗伞等。群落结构特征详见文献^[17]。

2 研究方法

采用小气候梯度观测法, 将 MAOS-1 全自动小气候观测系统(包括 4 层温度、湿度、风速; 1 层土壤热通量、辐射各分量、管状辐射表)(长春气象仪器研究所生产)及 10 套 TR-71 型自记温湿度计(日本 T AND 株式会社生产)安装在热带雨林定位样地梯度观测铁塔上(塔高 72m)。针对热带雨林 3 个乔木冠层、(简称冠层、冠层、冠层, 高分别约 33m、20m、5m), 在冠层以上 0.5m 布设一层温、湿、风传感器及辐射传感器(总辐射、反射辐射、净辐射), 在冠层、冠层以上 0.5m 及铁塔顶部各布设一层温、湿、风传感器, 10 套温湿度计自林下地表至林冠以上按 3m 间距布设(每 10min 采集 1 次数据), 距地表 2m 布设一支管状总辐射表。观测频度每小时 1 次。同时, 用 COMPAC3 型红外辐射温度计(日本 Minolta 株式会社生产)人工观测最上层林冠叶表面温度, 每小时 1 次, 每次测定 20 张叶片读数取平均值。同时, 在空旷矮草层(距热带雨林样地 5km 的气象观测场内)以上 0.5m、1.5m 处各布设一套 TR-71 型温湿度计, 测定其湿温度梯度变化。以上观测选择在 1999 年干热季 3 月 8~10 日, 均为晴朗无云天气, 具有典型的季节代表性。

3 结果

3.1 温度分布状况

由于最高林冠层为森林和大气作用的强烈活动层, 昼间可拦截 50% 以上的太阳辐射, 夜间又发射长波有效辐射降温, 因而林冠层温度变化十分剧烈。由图 1 可看出, 昼间中午以后, 林冠层为一明显的热源, 冠层最高气温可较林下近地表面高出 7~8℃, 林下为逆温分布。19:00 时, 冠层开始辐射降温, 到 7:00 时冠层达到最低温度(14℃)。从 17:00 到 0:00, 林下空气几乎呈等温分布, 0:00 到 7:00 则为绝热分布形式。同时, 5:00 至 8:00 时, 林冠层为一明显的冷源, 其最低温度可较林下地表面低出 2~3℃。不同高度处的温度日较差如表 1 所示。可看出, 干热季林冠层处温度日较差可达 13.6℃, 而林下地表仅为 3.9℃。由林冠层向上、向下, 各高度处的温度日较差依次降

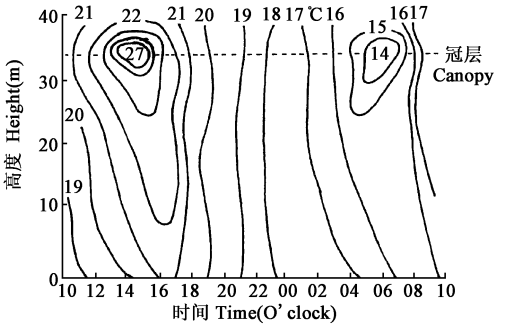


图 1 热带雨林林内空气温度(℃)垂直分布日变化(干热季)

Fig. 1 Diurnal change of air temperature (°C) in tropical rain forest shown as isopleths on height and time coordinates in dry hot season. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

低, 近林冠层 上、下空气降温率分别为 0.9 /m、0.3 /m, 其中以林冠层以上表现较明显。

表 1 热带雨林林内和林上最高、最低空气温度及相对湿度分布(干热季)
Table 1 Maximum and minimum air temperature () and air relative humidity (%)
in and above tropical rain forest in dry-hot season

高度 Height(m)	0 ^a	0.5	6	12	18	24	30	33 ^b	36	40
<i>T</i> _{max}	21.2	21.4	21.8	22.3	22.7	23.5	25.4	27.6	26.1	23.0
<i>T</i> _{min}	17.3	16.1	15.7	15.5	15.2	15.1	14.2	14.0	15.1	15.8
<i>T</i> _{range}	3.9	5.3	6.1	6.8	7.5	8.4	11.2	13.6	11.0	7.2
<i>RH</i> _{max}	—	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>RH</i> _{min}	—	87	74	72	68	65	61	60	63	65
<i>RH</i> _{range}	—	13	26	28	32	35	39	40	37	35

* *T*、*RH*、max、min、range: 分别表示温度、相对湿度、最高、最低及日较差 temperature, relative humidity; maximum, minimum and daily range, repectively, in this table; ^a 地表^a Ground surface; ^b 林冠层^b Canopy layer.

与空旷地表层相比, 林冠层 以上的降温强度较小(图 2), 其温度日变化也不如空旷地表的剧烈, 这也是林冠层 上的露水形成略迟于空旷地的主要原因。但林冠层雾的形成与消散时间却分别提前于和落后于空旷地, 这与林冠层 处夜间空气的较大湿度有关。

林冠层 处夜间的这种温度分布形式极有利于雾露首先在林冠层 处生成, 因为当林下温度较高时, 林冠层 处的温度已降到露点温度并形成雾露。由图 3 可看出, 18 00(太阳落山), 林冠层 的叶表温已明显低于气温, 此后叶表温与气温同步下降。22 00 时, 叶表温已降到露点温度并在叶表面形成少量露滴(因为叶表层高温低温), 此时林冠层 处空气水汽压及相对湿度也略有下降(图 5)。随着叶表温及气温的进一步降低, 到凌晨 3 00 时, 气温及叶表温均已降到或低于露点温度, 此时叶表面凝结了较多的露滴, 且林冠层 处有明显的雾形成, 少量水滴首先由上层林冠叶片滴落。此后雾露不断加浓、加重, 而且随着叶表露滴的凝结放热及雾层对林冠层长波有效辐射的削弱(图 6)(夜间长波有效辐射等于净辐射), 叶表温已略高于气温, 且二者均有回升。此后, 叶表温及气温又缓慢下降, 但前者一直高于后者。同时也可看出, 叶表温

在 3 00 点达到最低, 气温在 7 00 点达到最低, 前者低于后者 0.4 。

3.2 湿度分布状况

林内及林上空气相对湿度时空分布如图 4 所示。可看出, 其分布形式几乎与温度分布形式相反, 林冠层 处的最小相对湿度(60%)与最高温度(27)、最大相对湿度(100%)与最低温度(14)分别相对应, 而林下近地表层却全天保持在 80% 以上。0 00 至早晨 8 00, 森林所有层次均呈水汽饱和状态, 但林冠层向上的水汽输送仍在进行。与最高温分布形式不同的是, 雾出现后, 森林各高度处的最大相对湿度均达到了 100% (表 1), 但白天相对湿度由冠层 至林下地表依次升高。相对湿度日较差冠层 处达到最大(40%), 林下近地表层达到最小(13%), 且近冠层 上部的递减率大于下部。同时, 除了各层次相对湿度均达到 100% 时, 夜间其它时间冠层 处的相对湿度最大。

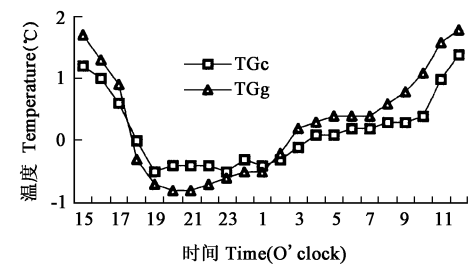


图 2 林冠层 及空旷地矮草层空气温度梯度变化(干热季)
Fig. 2 Variation of temperature gradient on canopy layer in the forest and grass layer in the clearing in dry-hot season
TGc, 林冠层 以上 0.5 ~ 1.5m, 0.5 ~ 1.5m above canopy; TGg, 矮草层 以上 0.5 ~ 1.5m, 0.5 ~ 1.5m above grass.

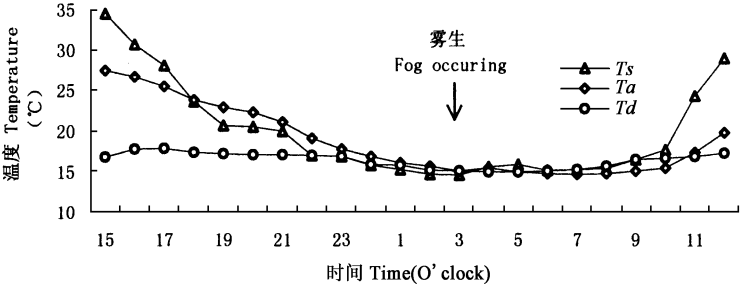


图3 林冠层 0.5m 处气温(T_a)、叶表温(T_s)及
露点温度(T_d)变化特征(干热季)

Fig. 3 Variation of air temperature (T_a), leaf surface temperature (T_s) and dew - point temperature (T_d) at 0.5m above the canopy in dry-hot season

由图5可看出,当冠层处的相对湿度接近饱和、饱和差趋近于0时(3:00),由于雾的形成并不断加浓加重,水汽压持续降低,到8:00时,水汽压降到最低(下降了1百帕)。日出后,随着雾的消散,相对湿度急剧降低,水汽压、饱和差相应升高。

图6表明,进入夜间后,土壤热通量负值不断增大(地表发射长波有效辐射加热上层空气),到凌晨3:00点雾形成后,由于受到雾层对有效辐射的削弱,土壤热通量负值急剧减小,此后又变缓。夜间冠层处的净辐射负值也是不断增大,随着冠层热量的不断散失,0后,其值开始变小。到3:00点雾形成后,受雾层影响,净辐射负值急剧减小。这说明,雾露的形成不仅凝结了水汽进入森林地表,同时对热带雨林也起到了一定的保温作用(雾露的凝结放热及雾层对有效辐射的阻挡)。

对林下各林冠层来说,由于其温度较林冠层处高(图1),当林冠层处雾露形成时,林下却没有雾露形成(下层露水形成时间较林冠层晚3~4h),只是随着林冠层处雾的变浓、下沉才扩散到林下。

3.3 风分布状况

由表2可看出,17:00时,由于林冠层温度高于林上气温,森林与大气作用强烈,因而风速较大,但以塔顶处最高,林下较小。19:00时,最上层林冠及塔顶风速均为0.2m/s,这种风速极有利于露水的形成(因小于0.5m/s的微风最有利于形成露^[3])。到22:00时,因近林冠层及林下均近似为等温分布,各冠层及塔顶处风速均为0。此后随着林冠层辐射降温的进行,3:00点时,冠层处形成雾,且露水也加重,而形成雾露所释放的凝结潜热又调整了近林冠层处的空气分布,因而

风出现,但其值较小。7:00点时,因雾露最为浓重,对冠层处空气的调整也最强,因而各冠层风速最大,但与白天相比,却是最上层林冠处风速最大、塔顶处次之。到10:00时,由于雾露的消散,太阳可直射林冠,

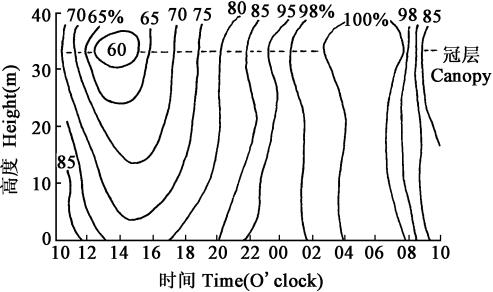


图4 热带雨林林内空气相对湿度(%)垂直
分布日变化(干热季)

Fig. 4 Diurnal change of air relative humidity (%) in tropical rain forest shown as isopleths on height and time coordinates in dry-hot season

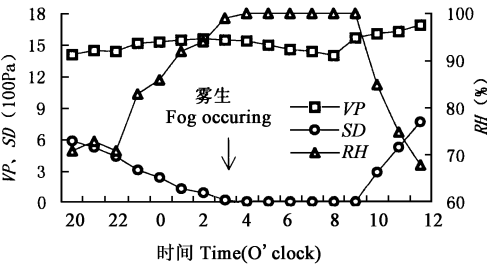


图5 林冠层 0.5m 处空气湿度变化特征(干热季)
Fig. 5 Variation of air humidity at 0.5m above the canopy in dry-hot season

VP: 水汽压 Vapour pressure; SD: 饱和差 Saturation deficit; RH: 相对湿度 Relative humidity

又出现风速由塔顶到林下逐渐减小的状况。

4 小结与讨论

群落最上层林冠既是雾露形成的决定层,又是雾露的首先形成层,林下露水形成迟于林上,林下雾是由上层雾变浓下沉而来。雾露的形成不仅凝结了水汽进入森林,同时也对森林起到了一定的保温作用。

热带雨林所塑造的温湿环境,不仅为其自身的生存和发展创造了条件,同时对区域气候也起到了调节作用。而西双版纳地区每年干季的干旱及雾凉季的低温(部分年份较严重)反过来又极大的影响着热带雨林群落部分树种的生长、发育。尤其是干旱期的雾露水对部分植物的开花、结实,犹如甘露。但西双版纳区域气候因热带雨林的大面积砍伐而逐渐变干、雾日数减少^[18],不能不说对热带雨林起到了一定的胁迫作用。因此,深入研究雾露水对森林的影响及其相互关系是值得的,尤其是在这个气候变暖、变干的时期。

表 2 群落各林冠层处 0.5m 及塔顶部风速(m/s)比较(干热季)

Table 2 Comparison of wind-speed (m/s) at 0.5m above different canopy and at the top of tower in the community in dry-hot season

时间 Time(O'clock)	17 00	19 00	21 00	23 00	01 00	03 00	05 00	07 00	09 00
塔顶 Top of tower	0.8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.3
冠层 Canopy	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.5	0.6	0.5
冠层 Canopy	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3
冠层 Canopy	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1

参考文献

[1] William R. Sources of water. In: T. T. Kozlowskied. *Water deficits and plant growth*. Academic press, New York, 1984. 1 ~ 20.

[2] Schimper A F W. *Pflanzen-geographie auf* · Physiologissche Grundlage. Jena. 1898.

[3] Lane-Poole C E. The Forest Resources of the Territories of Papua and New Guinea. Parliamentary Paper of the Commonwealth of Australia, Canberra, 1925.

[4] Brass L J. The 1938 ~ 1939 expedition to the snow mountains, Netherlands New Guinea. *Journal of the Arnold Arboretum*, 1941, **22**: 271 ~ 295, 297 ~ 342.

[5] Brass L J. Results of the Archbold Expedition. No. 86. Summary of the sixth Archbold Expedition to the New Guinea (1959). *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.* 1964. **127**: 145 ~ 215.

[6] Bruijnzeel L A and J Proctor. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forest: What do we really know? 25 ~ 46. In: L. S. Hamilton, J. D. Juvik, and F. N. Scatenaed. · *Tropical montane cloud forests*. Proceedings of an international symposium, East-west Center, Honolulu, Hawaii, USA, 1995.

[7] Kerfoot O. The distribution and ecology of *Juniperus Procera* Endl. in east central Africa, and it relationship to the genus *Widdringtonia* Endl. *Kirkia. Salisbury*, 1964, **4**: 75 ~ 86.

[8] Grubb P J and Whitmore T C. A comparison of montane and lawland rainforest in Ecuador. The climate and its effect on the distribution and physiognomy of the forest. *Journal of Ecology*, 1966, **54**: 303 ~ 333.

[9] Bruijnzeel L A. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. IHP-1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net> UNESCO. Humid Programme, Paris, France, 1990.

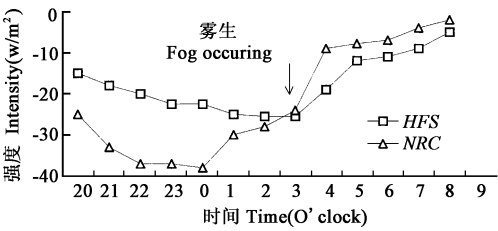


图 6 夜间土壤热通量(HFS)及林冠层 0.5m 处净辐射(NRC)变化特征(干热季)

Fig. 6 Variation of heat flux in soil (HFS) and net radiation at 0.5m above canopy (NRC) during the night in dry-hot season

[10] Unsworth M H and A Crossley . Capture of winddriven cloud by vegetation. 1In: P. J. Coughtrey, M. H. Martin, M. H. ed. Unsworth, Pollutant transport and fate in ecosystems. Black well, Oxford, U K. 1987. 25 ~ 127.

[11] Asbury C E, W H McDowell, R Trinidad-Pizarro, S Berrios. Solute deposition from cloud water to the canopy of a Puerto Rican montaine forest. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**: 1773 ~ 1780.

[12] Ishibashi M and I Terashima. Effects of continuous leaf wetness on photosynthesis: Adverse aspects of rainfall. *Plant Cell and Environment*, 1995, **18**: 431 ~ 438.

[13] Monteith J L and M H Unsworth. *Principles of environmental physics*. Second edition. · Edward Arnold. London, U K. 1990.

[14] 朱 华. 望天树林与相近类型植被结构的比较研究. 云南植物研究, 1993, **15**(1): 34 ~ 46.

[15] 张克映. 滇南气候特征及其形成因子的初步分析. 气象学报, 1966, **33**(2): 210 ~ 230.

[16] 刘文杰, 李红梅. 西双版纳地区露水资源分析. 自然资源学报, 1998, **13**(1): 40 ~ 45.

[17] Cao M and Zhang J H, *et al.* Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, South west China. *Tropical Ecology*, 1996, **37**: 183 ~ 192.

[18] 张克映, 张一平. 西双版纳森林砍伐对地方气候的影响. 见: 中国农学会农业气象委员会, 中国林学会合编. 林业气象文集. 北京: 气象出版社, 1984. 14 ~ 23.

《农业可持续发展概论》出版

由中国工程院院士、中国生态学会理事长、中国科学院地理科学与自然资源研究所研究员李文华先生和浙江省生态学会理事长、浙江大学教授王兆骞先生作序, 浙江省生态学会秘书长、浙江大学副教授严力蛟等编著的《农业可持续发展概论》已于 2001 年 1 月由中国环境科学出版社出版发行。

《农业可持续发展概论》基于本领域先辈和同行的研究成果与学术思想, 从整体化的角度和理论与实践相结合的方法, 较为系统地介绍了农业可持续发展的缘起与内涵, 论述了气候变化、自然资源、环境污染、水体富营养化、无污染农产品、区域开发以及高新技术与农业可持续发展的关系, 阐述了农业可持续发展的规划与设计、农业可持续发展的评价及其指标体系、农业可持续发展的若干模式, 最后对农业可持续发展的前景作了展望。本书所收集的资料十分丰富, 行文流畅, 通俗易懂, 既具有系统性、科学性和可读性, 又兼备实用性和可操作性, 能从浅出中见到深入, 不失为一本论述农业可持续发展的好书, 可供生态学、农业科学和农业生态学工作者阅读, 同时也是大专院校相关专业师生的一本不可多得的参考书。全书共计 30.8 万字, 定价 40.00 元。

目前我单位尚有少量余书, 以每册 40.00 元出售, 需要者请将书款按每册 40.00 元(免邮费) 邮汇: 310029 杭州凯旋路 268 号 浙江大学生态所徐佩君老师 电话: (0571) 6971154。款到即寄书。需要正式发票者请在汇款单中或来函说明。

(浙江大学生态所 徐佩君)