

土地覆被变化过程中叶面积指数与降水量对 地表能量平衡的贡献 ——基于SiB2的模拟结果

刘凤山^{1,2}, 陶福禄¹, 肖登攀³, 张 帅¹, 王 猛^{1,2}, 张 贺^{1,2}, 柏会子^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011)

摘要: 土地覆被变化过程中, 叶面积指数(LAI)是地表能量平衡重要的影响因素, 且与降水等多种因素存在交互作用。以2003年中国东北地区农田、森林和草地三种覆被类型和三种LAI月变化过程为研究对象, 着重分离出土地覆被变化过程中LAI对地表能量平衡的作用, 认清覆被和LAI变化对地表能量平衡的相对作用。利用SiB2模型研究不同降水条件下土地覆被和LAI变化对地表能量平衡的影响。结果表明: ① 覆被变化对净辐射的影响最大, 年均 $14.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。② LAI主要改变净辐射对潜热和显热的分配, 对农田和草地而言, LAI增加明显提高(减小)潜热(显热)分配比例; 对森林而言, LAI对潜热和显热分配的影响较弱。③ 降水对净辐射的分配起重要作用, 降水增加, 潜热增加。④ 表层土壤水分受降水和LAI调控, 与潜热有相反的变化趋势。

关键词: LAI; 地表能量平衡; 土地利用和覆被变化; SiB2; 土壤水分; 潜热

DOI: 10.11821/dlyj201407007

1 引言

土地利用和土地覆被变化(LUCC)通过生物地球物理过程对气候的影响已越来越引起科学界的注意。LUCC影响气候的生物地球物理过程主要包括反照率、能量分配和粗糙度等^[1]。反照率表征了生态系统对短波辐射的吸收能力, 反照率小, 吸收的短波辐射多。在高纬度地区, 森林砍伐成草地或农田造成的反照率上升是温度下降的主要原因^[2]。在低纬度地区, 森林减少增加区域温度, 起主要作用的生物地球物理过程是能量分配和粗糙度。因为该地区农田或草地有相对低效的呼吸作用和冠层蒸发能力, 导致能量主要用于显热分配; 而且农田和草地的冠层低矮, 地表粗糙度较小, 降低了空气的湍流扩散能力, 影响潜热的扩散, 进一步增加了显热分配^[2,3]。

LUCC过程中, 反照率和能量分配变化与叶面积指数(LAI)有重要且复杂的关系。对于不同土地利用类型, 森林通常比草地或者农田的LAI高, 反照率比草地或者农田的低^[2], 但是LAI与反照率的关系受多种因素的影响, 表现出不同的变化规律。以草地为

收稿日期: 2013-11-10; 修订日期: 2014-04-03

基金项目: 国家“973”计划项目(2010CB950900)

作者简介: 刘凤山(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事土地利用变化对气候的生态效应和机理研究。

E-mail: liufengshan0225@163.com

通讯作者: 陶福禄(1970-), 男, 研究员, 主要研究领域为生态系统生态学、全球变化生态学和农林气象学。

E-mail: taofl@igsnrr.ac.cn

例, Hammerle 等^[4]发现草地的反照率与 LAI 呈指数关系, LAI 达到 $3.4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 后反照率增加速率变小; 部分研究结果证明反照率与 LAI 呈正比例关系^[5-7], 也有结果表明 LAI 与反照率呈反比^[8]。森林和农田的反照率, 受土壤水分、降水量、冠层结构等的影响^[9,10], 与 LAI 有明显且复杂的关系^[11]。地表能量分配与 LAI 有密切的联系, 在其他因素相同的情况下, 潜热分配比例与 LAI 成正比例关系^[4]。不同植被类型对于潜热分配和 LAI 的正比例关系有较大的影响。在中纬度温带地区土壤水分充足的春夏两季, 农田有比较大的潜热分配比例^[12-14], 植被的生理特征影响增强, 弱化了 LAI 与能量分配的关系。最新研究结果表明, LAI 与植被高度也有一定的影响^[15], 从而对粗糙度产生一定的作用^[16]。

LUCC 过程中, 变化的参数还包括植被的高度、生理特性及根系深度等, 这些因素都对地表能量平衡有影响。如植被高度的变化可以改变地表粗糙度, 影响空气的湍流扩散; 根系深度对模型模拟地表能量平衡和潜热的能力有极大的提升^[17]。这些因素的变化影响了 LAI 对 LUCC 过程中反照率和能量分配变化的单独贡献, 而且这些因素对能量平衡过程的影响也受到 LAI 的影响。LUCC 过程中, 把各个参数对反照率和能量平衡的影响分离开来的研究相对较少, 尤其 LAI 可能是地表能量平衡过程的重要因素, 极大地影响净辐射对于潜热的分配。因此本文通过将 LAI 与其他植被参数分离, 独立地分析 LAI 和其他植被参数对地表能量平衡和反照率的影响。

在简单生物圈模型 2(Simple Biosphere Model 2, SiB2)中, 植被主要通过三个过程对地表能量平衡产生影响^[18]: 形态学结构通过粗糙度改变能量传输; 光学特性利用反照率影响冠层吸收的净辐射; 生理活动控制气孔开张决定地表能量平衡过程。LUCC 过程中, 土地覆被变化对植被固有的光学特性和生理特性起控制作用, LAI 通过控制冠层的结构和分布对上述三个过程都有影响。因此, 在模型中 LAI 对地表能量平衡有直接的重要的影响, 而且不同土地覆被和不同 LAI 变化对模拟结果的影响是复杂的。因此文中利用 SiB2 模型研究了不同降水条件下覆被数据与 LAI 数据变化对地表能量平衡的影响, 分析 LAI 和其他植被参数对地表能量平衡独立地贡献。

2 研究方法

2.1 地表能量平衡过程

地表能量平衡过程表征了地面或物体获得的净辐射能量必须以各种方式散失掉的过程^[2], 即:

$$R_n = SH + LH + G \quad (1)$$

式中: R_n 为地面或物体获得的净辐射能量; SH 为显热, 是通过空气运动传递能量的过程; LH 为潜热, 是通过水分蒸散发散失能量的过程; G 是通过热量传导的方式由高温物体传递到低温物体的过程, 称为热传导, 由于该项主要通过土壤传递, 也称为土壤热通量。

$$SH = -\rho c_p (T_a - T_s) / r_H \quad (2)$$

式 (2) 表明通过空气流动传递热量的 SH 跟物体 (T_s) 与周围空气 (T_a) 的温度差成正比, 与传递阻力 (r_H) 成反比, ρ 为空气密度, c_p 是空气的比定压热容。

$$LH = -\rho c_p (e_a - e(T_s)) / (\gamma r_w) \quad (3)$$

式 (3) 表明通过蒸散发散失热量的 LH 受水汽压差和阻力的影响。其中 e_a 是空气的水汽压, $e(T_s)$ 是温度为 T_s 时的饱和水汽压, γ 是湿度计算常数, r_w 为类似于空气传递阻力的水汽传输阻力系数。

$$G = \kappa(\Delta T/\Delta z) \quad (4)$$

式(4)说明土壤热传输速率主要与导热系数(κ)和两个物体间的温度梯度($\Delta T/\Delta z$)有关。 G 在能量平衡过程中比重较低, LH 和 SH 是净辐射的主要分配方式,植被主要通过影响 R_n 在 LH 和 SH 间的分配对气候产生作用。

2.2 模型简介

简单生物圈模型2 (Simple Biosphere Model 2, SiB2)是在SiB基础上,由Sellers等改进的基于植物生理过程的土壤-植被-大气模式。模型根据植被能量平衡和生活型动态将全球植被分为九类,有效地结合陆气交互作用^[22],广泛用于地表能量平衡过程^[23]和GCM研究^[24]。

SiB2利用光合作用—气孔导度的子程序模拟叶片和冠层的水汽交换,进而控制净辐射分配到潜热和显热的比例。土壤和冠层的反照率通过二流近似辐射传输模型^[25]分波段进行计算。水热通量分别根据温度和水汽压差及对应的空气动力学阻力进行计算^[19]。SiB2对于能量平衡各过程的计算与植被密切相关,植被变化显著影响水热平衡过程^[18]。

2.3 研究区概况和实验设计

研究区位于中国吉林省(图1),选择的覆被类型包括农田、草地和森林,其中农田和草地位于吉林省通榆县(44°25'N、122°52'E, 184 masl),森林位于吉林省东南部中国科学院长白山森林生态系统定位站针阔混交林内(42°24'N、128°6'E, 738 masl),本文使用的数据均测量于2003年。农田的主要作物是玉米,草地属于退化草地,两者相隔5 km。农田生长季为5-10月,生长高度可以达到2 m;草地生长期较长,高度最高为0.08 m;森林冠层上层高度为26 m,下层高度为8 m,主要乔木包括红松、椴树、蒙古栎、水曲柳和色木槭等。SiB2模型中根据站点实测数据进行参数的设置。

在这3个站点均有利用涡度相关方法测量的净辐射、潜热和显热等资料^[26,27]。这些资料经过坐标轴旋转、WPL矫正等处理过程后对SiB2模型的模拟结果进行了验证。模型输入的LAI数据(图2)是根据2003年站点实测值^[26,28]拟合GLASS数据^[29]获得的。不同植被有不同的LAI变化过程,其中森林的LAI最高,农田次之,草地最低,且这种关系具有一

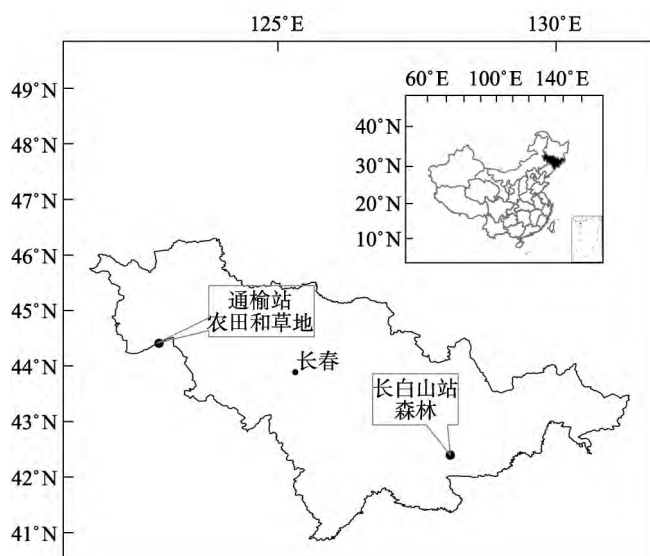


图1 研究站点示意图

Fig. 1 The location of the study area

致性。

如图3所示, 实验设计是模拟不同降水条件下各种植被和LAI对地表能量平衡的影响, 其中降水条件指单次降水量减半($0.5 \times P$)、不变($1 \times P$)或者翻倍($2 \times P$); 植被(VEG)指模拟过程中除LAI之外的其他植被参数, 如生理参数、植被高度、冠层高度等; 将LAI从植被参数分离出来是为了单独研究LAI数据对地表能量平衡的影响。对应三种植被类型分别分离出三组植被参数和LAI过程。三种植被的光学和生理参数以模型中的预赋值为准^[20], 形态学参数根据实测数据赋值。不同植被的LAI月变化过程如图2所示。假设LAI与地表能量平衡是正比例关系, 即无论LAI与能量平衡是曲线关系还是线性关系, LAI增加则地表能量平衡各分量相对应的增加或减小, 两种植被LAI的差异越大, 能量平衡各分量的差异也越大。在全年中, 不同植被LAI的大小均是森林>农田>草地, 相对应的能量平衡也具有一致的变化规律, 因此LAI对地表能量平衡的影响可以从年平均值进行分析。

对每组实验, 设定三组降水条件, 即 $0.5 \times P$ 、 $1 \times P$ 和 $2 \times P$, 以研究降水对地表能量平衡的影响及降水和植被交互作用对能量平衡的影响。对应于农田、森林和草地三种植被类型, 有三组植被因子(VEG 1、VEG 2和VEG 3)和三组LAI(LAI 1、LAI 2和LAI 3)动态, 在每组降水条件下, 分别模拟植被和LAI的不同组合, 共27种模拟, 分析降水、植被和LAI动态对地表能量平衡的影响。

3 结果分析

3.1 模型验证

以农田为例(图4), SiB2模型模拟结果增大了净辐射的变化幅度, 但降低了其年平均值($y=0.8053x-10.273$, y 代表模拟值, x 代表实测值, x 和 y 的代表意义下同)。在DOY(儒略日)200前, R_n 模拟值高于实测值, 在DOY 200之后, 模拟的极大值与实测值近似, 但是在生育期中, 模拟的极小值小于实测值, 尤其在DOY 200之后, 模拟的 R_n 下降很快, 即模拟的净辐射峰值提前出现, 变化幅度更大。模型较好地模拟了农田潜热的年变化趋势, 总体上模拟的潜热值偏大(图4, $y=1.0524x+4.8941$)。模型对温度的年变化趋势模拟结果良好(图4, $y=0.9841x+6.1193$)。在草地类型中(结果未显示), 模型对净辐射、潜热和温度的模拟与在农田的模拟趋势相似, 即净辐射峰值提前出现、潜热偏大、温度较好。在农田和草地类型中, 净辐射、潜热和显热的模拟值变化幅度大于实测

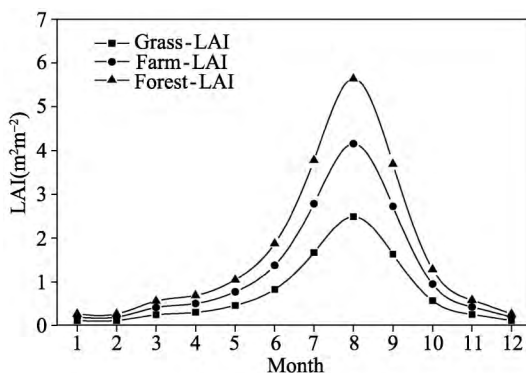


图2 农田、草地和森林叶面积指数的月变化趋势
Fig. 2 The monthly variation trend of leaf area index (LAI) at farmland, grassland and forest

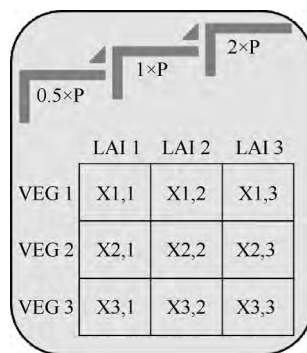


图3 实验设计概念示意图
注: $x \times P$ 表示单次降水量(mm)变化 x 倍数; LAI表示叶面积指数($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$); VEG表示覆被类型
Fig. 3 The conceptual illustration of experimental design

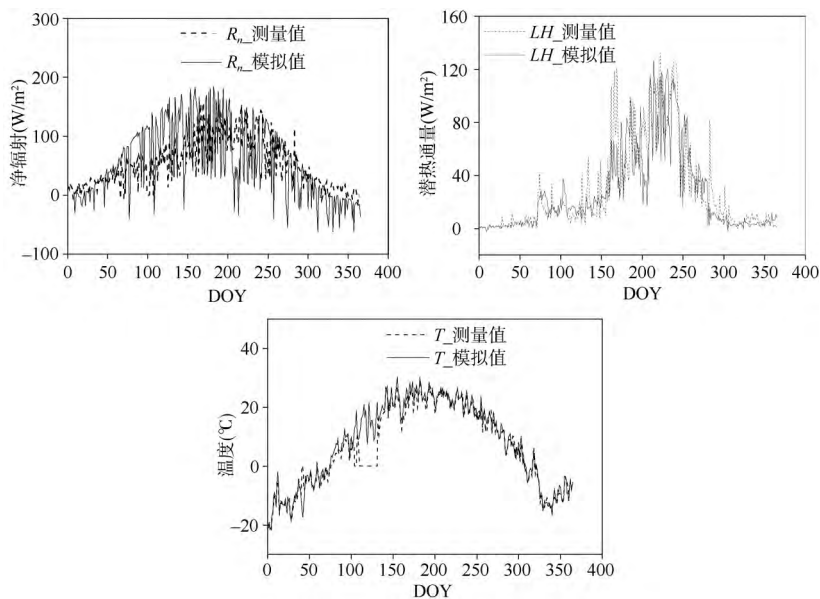


图4 2003年农田净辐射(R_n)、潜热(LH)和温度(T)的模拟值与实测值比较

Fig.4 The comparison between simulated values and measured values for net radiation (R_n), latent heat (LH), and temperature (T) at farmland in 2003

值的变化幅度。在森林类型中（结果未显示），SiB2模型同样较好的模拟了净辐射、潜热和温度的年变化趋势。

3.2 不同降水条件植被对地表能量平衡的影响

降水量对地表能量分配有重要的影响（表1）。在农田，单次降水量增加，轻微增加了净辐射和土壤热通量，显著降低了显热通量，显著增加了潜热通量，增加了表层土壤水分；在森林，降水量增加，对潜热和显热的影响显著，对净辐射和土壤热通量的影响较小，表层土壤水分增加；在草地，降水对能量分配于潜热和显热有重要的影响，增加了土壤水分。

不同植被对能量分配的影响存在差异。森林吸收了最多的净辐射，农田吸收的净辐射最少；而农田将更多的能量用于潜热分配，草地对于潜热的分配比例最低；农田的显热分配比例最低，草地的显热分配比例最高；土壤热通量在各种降水和覆被条件下，其比例都较低，且变化较小。

降水对不同植被间的能量分配差异产生影响（表1）。在0.5倍降水条件下，农田潜热和显热的分配比例分别为68.5%和24.8%，森林潜热和显热的分配比例分别为58%和37.7%，草地的潜热和显热的分配比例分别为48.7%和45.5%；在降水不变条件下，农田潜热和显热的分配比例分别为87.1%和6.6%，森林潜热和显热的分配比例分别为84.5%和11%，草地的潜热和显热的分配比例分别为63.1%和32.6%；2倍降水条件下，农田潜热和显热的分配比例分别为91.1%和2.4%，森林潜热和显热的分配比例分别为81.1%和14.3%，草地的潜热和显热的分配比例分别为65.8%和29.7%。降水变化对农田的影响最大，对草地的影响最小。而且，在三种植被类型中，0.5倍降水对能量分配的影响大于2倍降水对能量分配的影响。

降落到生态系统的水分，首先进入土壤，以土壤水分的形式被植被吸收，然后通过气孔蒸腾到大气中^[30]。因此储存在土壤中的水分可以间接证明降水在生态系统中的再分

表1 不同降水条件下覆被对地表能量平衡和表层土壤水分湿度的影响

Tab. 1 The influences of different land cover types on surface energy balance and top-layer wetness in different precipitation conditions

	Precipitation	R_n	SH	LH	G	www1
农田 LAI=1.21	0.5×P	37.25	9.25	25.51	2.47	0.28
	1×P	37.94	2.49	33.04	2.36	0.32
	2×P	38.03	0.92	34.64	2.36	0.33
森林 LAI=1.64	0.5×P	54.06	20.39	31.36	2.24	0.30
	1×P	55.68	6.13	47.07	2.42	0.32
	2×P	55.40	7.93	44.95	2.44	0.34
草地 LAI=0.73	0.5×P	42.93	19.53	20.90	2.43	0.28
	1×P	43.47	14.18	27.43	1.74	0.37
	2×P	43.54	12.95	28.64	1.75	0.38

注: www1表示土壤表层水分湿度(%),其他缩写同图3和图4。下同。

配。在0.5倍降水量条件下,土壤水分含量最低,且三种类型水分含量相近,表明此时降水不能及时补充植被和地表蒸散发所需的水分;在1倍降水条件下,土壤水分含量增加,尤其是草地土壤水分增幅很大,降水不仅仅满足了植被蒸腾的需要,极大地增加了潜热分配比例,而且有部分以土壤水分的形式储存下来;随着降水的再次增加,土壤水分的增加幅度变小,且各种类型的潜热分配增加有限,此时多余的水分以径流或深层渗漏的形式流出生态系统。

本节对植被和LAI数据一致情况下,在不同降水条件下分析地表能量平衡对不同植被的响应,是比较植被不同LAI对能量平衡影响大小的基础。根据农田、森林和草地LAI的月变化动态,计算出三种植被类型的年平均LAI分别是 $1.21\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1.64\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.73\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ 。在文中以此数值代表三种LAI年变化动态,并据此分析植被使用不同LAI对地表能量平衡的影响。

3.3 不同降水条件LAI对农田地表能量平衡的影响

随着LAI的增大,农田吸收的净辐射降低,三种LAI条件下对净辐射的平均影响为 $1.57\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。而不同植被类型对净辐射的影响在 $14.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右(表2),LAI对净辐射的影响小于植被对净辐射的影响。降水量对净辐射的影响较小,平均为 $0.40\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。LAI对土壤热通量的影响也较小,年均土壤热通量始终小于 $2.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,变化幅度小于 $0.75\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

无论使用何种LAI过程,随着LAI的增大,潜热增加,显热减小。而且降水与LAI过程存在交互作用,即降水量越多,LAI对净辐射分配到潜热的比例越大,展示了农田地区LAI对潜热更强的控制能力。

降水以土壤水分的形式影响能量分配,潜热分配的变化与土壤水分的变化呈现一致性。LAI增加,造成潜热分配增多,从而降低表层土壤水分;降水增多,LAI=0.73的潜热增加较慢,土壤水分增加速度大于LAI=1.64的土壤水分增加速度。

3.4 不同降水条件LAI对森林地表能量平衡的影响

森林吸收的净辐射随LAI的减小而减小(表3)。LAI对森林净辐射吸收的影响小于 $1.6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,对比于植被类型对净辐射的影响 $14.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,降水量对净辐射的影响 $0.49\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,森林中对净辐射影响最大的仍然是植被因素,降水量的影响最小。

LAI降低,潜热和显热存在小幅减小,这可能受净辐射减小的影响。从分配比例

表2 不同降水条件LAI对农田地表能量平衡和表层土壤水分湿度的影响
Tab. 2 The influences of LAI on surface energy balance and top-layer wetness at farmland in different precipitation conditions

	Precipitation	R_n	SH	LH	G	www1
农田 LAI=0.73	0.5×P	39.30	12.63	24.15	2.47	0.28
	1×P	39.83	7.63	30.12	2.02	0.35
	2×P	39.88	6.35	31.35	2.07	0.36
农田 LAI=1.64	0.5×P	35.90	7.53	25.87	2.47	0.28
	1×P	36.80	-1.11	35.39	2.47	0.31
	2×P	36.91	-2.78	37.11	2.48	0.33

表3 不同降水条件LAI对森林地表能量平衡和表层土壤水分湿度的影响
Tab. 3 The influences of LAI on surface energy balance and top-layer wetness at forest in different precipitation conditions

	Precipitation	R_n	SH	LH	G	www1
森林 LAI=1.21	0.5×P	53.25	19.80	31.16	2.22	0.29
	1×P	54.86	5.71	46.69	2.39	0.31
	2×P	54.62	7.26	44.85	2.41	0.33
森林 LAI=0.73	0.5×P	51.84	18.81	30.74	2.21	0.29
	1×P	53.33	5.83	45.05	2.36	0.31
	2×P	53.20	6.39	44.30	2.40	0.32

看，潜热比例和显热比例在不同LAI条件下变化均不大；降水对能量分配的影响较大，降水增加，增加潜热分配，降低显热分配。LAI与能量分配关系不明显，造成表层土壤水分含量随LAI的变化不大。

3.5 不同降水条件LAI对草地地表能量平衡的影响

随着LAI增加，草地吸收的净辐射小幅减小（表4），平均减小幅度为 $1.44\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。降水量对净辐射的平均影响为 $0.42\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，植被类型对净辐射的影响最大。LAI对能量分配的影响最大，极大地改变了净辐射对于潜热和显热的分配，且随着LAI的增加，潜热增加，显热减少。潜热与土壤水分也呈现此消彼长的关系。

3.6 不同降水条件下LAI对地表能量平衡月变化的影响

本文结果是基于地表能量平衡的年平均数据，所需的前提是LAI与能量平衡存在正比例关系。如果不是这种关系，则利用年平均数据分析的结果会存在一定的误差。在三种降水量条件下，净辐射差异较大的时间是4-8月（图5a~c）；显热差异较大的时间是4-9

表4 不同降水条件LAI对草地地表能量平衡和表层土壤水分湿度的影响
Tab. 4 The influences of LAI on surface energy balance and top-layer wetness at grassland in different precipitation conditions

	Precipitation	R_n	SH	LH	G	www 1
草地 LAI=1.21	0.5×P	41.11	14.55	24.02	2.47	0.28
	1×P	41.76	9.78	29.82	2.04	0.35
	2×P	41.85	8.49	31.10	2.05	0.36
草地 LAI=1.64	0.5×P	39.70	12.32	24.81	2.49	0.28
	1×P	40.76	6.68	31.69	2.26	0.33
	2×P	40.86	5.23	33.19	2.23	0.34

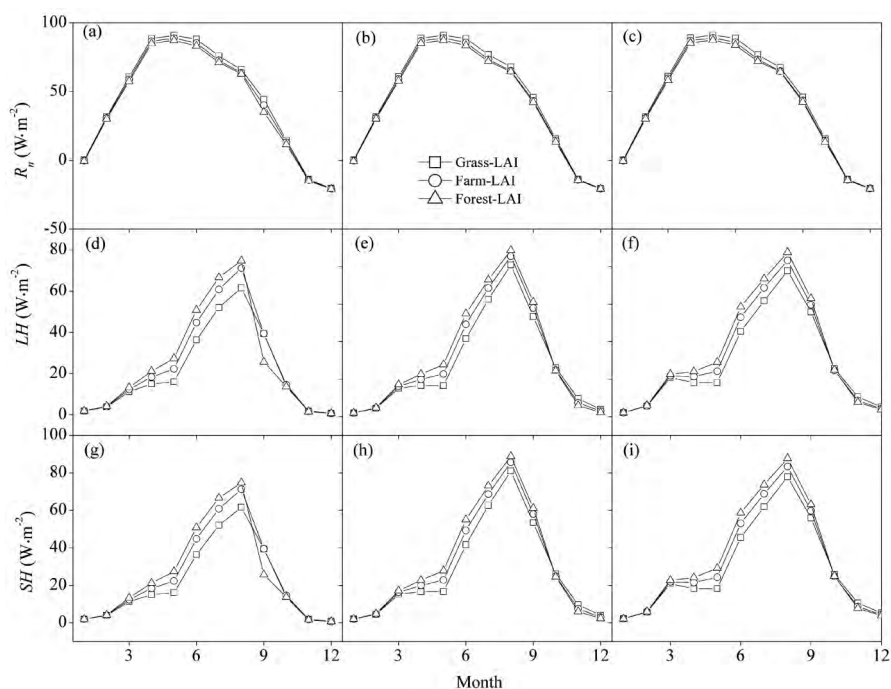


图5 不同降水条件下植被对地表能量平衡各分量月变化的影响

注: a、d、g表示0.5×P条件下; b、e、h表示1×P条件下; c、f、i表示2×P条件下

Fig. 5 The monthly changes of the components of surface energy balance affected by land cover in different precipitation conditions

月 (图5d~f); 潜热差异较大的时间是5-8月 (图5g~i)。而不同植被类型LAI差异较大的时间是5-9月份 (图2)。能量平衡各分量的差异与不同植被LAI的差异大小基本符合。不太理想的情况是LAI的差异在8月达到最大, 相对应的能量平衡各分量的差异并不都是在8月达到最大。从月变化可以看出, LAI对净辐射的影响较弱, 对潜热和显热的的影响较强, 再次表明LAI对净辐射分配的影响更强。

4 结论与讨论

本文利用简单生物圈模型设定三个输入变量: 降水量、植被和叶面积指数, 以研究在不同降水量条件下叶面积指数和其他植被参数对能量分配的影响。模型对降水量减半或翻倍的设定, 是仅仅针对单次降水量的变化, 并没有考虑何种因素导致了降水量变化及降水量变化代表的实际意义。因此降水量变化可以看作是生态系统输入水分的减少或增多, 造成土壤水分、冠层截留和地表径流的减少或增加, 在一定时间内改变土壤反照率和冠层反照率^[31], 进而对净辐射产生一定的影响。若考虑何种因素导致了降水量变化, 如云量、短波辐射等^[32,33], 降水量变化对净辐射的影响将会更大^[34]。在三种植被类型中, 降水量均对地表能量分配产生重要的影响。

不同植被净辐射的差异主要受反照率的影响, 植被对反照率的影响参数包括LAI、植被高度、植被密度、植被几何构型、植被叶片的光谱特征等^[35-37]。低密度植被中, 更多的太阳辐射直接射入到土壤表面, 植被对反照率的影响较弱, 复杂冠层中, 植被对太阳

辐射的截获更多^[38]。沙化土地的光谱特征与土壤湿度、草地类型、草群高度和盖度以及不同物候期植被光谱特征相关^[39]。因此净辐射的影响因素较多,受叶面积指数的控制较弱。分析结果表明,在受控的三个叶面积指数量级上,叶面积指数增加造成净辐射减少,叶面积指数与反照率成正比^[5-7]。但叶面积指数对净辐射的影响有限,植被的其他参数对净辐射的影响较大。

叶面积指数对净辐射在潜热和显热间分配的影响最为显著,而且与植被类型和降水量存在交互作用。在农田和草地,叶面积指数增加,显著增加潜热和降低显热;在森林,叶面积指数增加对潜热的促进作用较弱,显热降低不明显。在三种植被类型中,降水量减半对潜热分配的抑制作用很强;降水量增加对潜热的促进作用相对较弱,且降低了叶面积指数对潜热的有利作用。Emmel等^[38]通过在冠层的不同高度进行测量,发现波文比随冠层高度的增加而增加,说明不同高度的冠层对净辐射分配的影响不同。森林相较于草地和农田,根系较深^[17,40],且深层土壤水分含量更高^[41],因此降水对其能量分配的影响较弱。

为减少太阳辐射等^[32,33]的变化对研究结果的干扰,本文对于降水的选择,机械性的增加或者减少其数量,没有考虑研究区内的实际降水量的变化幅度,其极端降水情况会减弱文章的研究意义。森林站点与农田和草地站点相距较远,存在气象背景的差异,虽然土地利用覆被变化过程中假定三种植被位于相同的地区,但现实中空间上的距离可能会对植被类型的比较造成一定的影响。

参考文献(References)

- [1] Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 2013, DOI: 10.1002/joc.3736.
- [2] 戈登 B 伯南. 生态气候学: 概念与应用. 北京: 气象出版社, 2009: 131-151. [Bonan G B. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 131-151.]
- [3] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320 (5882): 1444-1449.
- [4] Hammerle A, Haslwanter A, Tappeiner U, et al. Leaf area controls on energy partitioning of a temperate mountain grassland. *Biogeosciences*, 2008, 5(2): 421-431.
- [5] Rosset M, Riedo M, Grub A, et al. Seasonal variation in radiation and energy balances of permanent pastures at different altitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 86(3-4): 245-258.
- [6] Song J. Phenological influences on the albedo of prairie grassland and crop fields. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42(3): 153-157.
- [7] Li S G, Eugster W, Asanuma J, et al. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1): 89-106.
- [8] Anadranistakis M, Liakatas A, Kerkides P, et al. Crop water requirements model tested for crops grown in Greece. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(3): 297-316.
- [9] 张学珍. 锡林郭勒草原地表反照率对气候变化的响应. *地理研究*, 2012, 31(2): 299-310. [Zhang Xuezheng. The responses of surface albedo to climatic changes in Xilin Gol grassland. *Geographical Research*, 2012, 31(2): 299-310.]
- [10] 肖登攀, 陶福禄, Juana M. 全球变化下地表反照率研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1217-1224. [Xiao Dengpan, Tao Fulu, Juana M. Research progress on surface albedo under global change. *Advances in Earth Science*, 2011, 26 (11): 1217-1224.]
- [11] Manninen T, Korhonen L, Riihela A, et al. Boreal forest albedo and LAI in SNORTEX 2008-2010. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2012 (IGARSS 2012)*, 2012. 3335-3338.
- [12] Boisier J P, De Noblet-Ducoudré N, Pitman A J, et al. Attributing the impacts of land-cover changes in temperate regions on surface temperature and heat fluxes to specific causes: Results from the first LUCID set of simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D12): D12116.
- [13] Teuling A J, Seneviratne S I, Stockli R, et al. Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geoscience*, 2010, 3(10): 722-727.
- [14] Baldocchi D D, Vogel C A, Hall B. Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a bore-

- al jack pine forest canopy. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D24): 28939-28951.
- [15] Yuan Y, Wang X, Yin F, et al. Examination of the quantitative relationship between vegetation canopy height and LAI. *Advances in Meteorology*, 2013, 2013: 1-6.
- [16] Raupach M. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 71(1-2): 211-216.
- [17] Zeng X B, Dai Y J, Dickinson R E, et al. The role of root distribution for climate simulation over land. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(24): 4533-4536.
- [18] Pongratz J, Bounoua L, Defries R S, et al. The impact of land cover change on surface energy and water balance in Mato Grosso, Brazil. *Earth Interactions*, 2006, 10(19): 1-17.
- [19] Sellers P, Randall D, Collatz G, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [20] Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 706-737.
- [21] Sen O L, Shuttleworth W J, Yang Z L. Comparative evaluation of BATS 2, BATS, and SiB2 with Amazon data. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, 1(2): 135-153.
- [22] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [23] Hanan N P, Berry J A, Verma S B, et al. Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great Plains tallgrass prairie and wheat ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3): 162-179.
- [24] Randall D, Dazlich D, Zhang C, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part III: the greening of the Colorado State University general circulation model. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 738-763.
- [25] Dickinson R E. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance. *Advances in Geophysics*, 1983, 25: 305-353.
- [26] Yan X D, Li H Y, Liu F, et al. Modeling of surface flux in Tongyu using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2). *Journal of Forestry Research*, 2010, 21(2): 183-188.
- [27] Wang Qiufeng, Niu Dong, Yu Guirui, et al. Simulating the exchange of carbon dioxide, water vapor and heat over Changbai Mountains temperate broad-leaved Korean pine mixed forest ecosystem. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(A02): 131-140.
- [28] 关德新, 吴家兵, 王安志, 等. 长白山红松阔叶混交林林冠层叶面积指数模拟分析. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 499-503. [Guan Dexin, Wu Jiabing, Wang Anzhi, et al. Simulation of crown leaf area index of Korean pine and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 499-503.]
- [29] Liang S L, Xiao Z Q. *Global Land Surface Products: Leaf Area Index Product Data Collection (1985-2010)*. Beijing: Beijing Normal University, 2012.
- [30] 孟春红, 夏军. “土壤水库”储水量的研究. *节水灌溉*, 2004, (4): 8-10. [Meng Chunhong, Xia Jun. Research on the water storage of soil reservoir. *Water Saving Irrigation*, 2004, (4): 8-10.]
- [31] Allen S, Wallace J, Gash J, et al. Measurements of albedo variation over natural vegetation in the Sahel. *International journal of climatology*, 1994, 14(6): 625-636.
- [32] Lebsack M, Morrison H, Gettelman A. Microphysical implications of cloud-precipitation covariance derived from satellite remote sensing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(12): 6521-6533.
- [33] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008-2012年). *大气科学*, 2013, 37(2): 351-363. [Guo Xueliang, Fu Danhong, Hu Zhaoxia. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008-2012. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 351-363.]
- [34] Lhermitte R. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(3): 464-479.
- [35] 刘纪远, 张增祥, 庄大方. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. *地理研究*, 2003, 22(1): 1-12. [Liu Jiyan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 1-12.]
- [36] Loarie S R, Lobell D B, Asner G P, et al. Land-cover and surface water change drive large Albedo increases in South America. *Earth Interactions*, 2011, 15(7): 1-16.
- [37] Pinker R T, Thompson O E, Eck T. The albedo of a tropical evergreen forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(449): 551-558.
- [38] Emmel C, Paul-Limoges E, Black T A, et al. Vertical distribution of radiation and energy balance partitioning within and above a lodgepole pine stand recovering from a recent insect attack. *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 149(2): 133-163.

- [39] 李海萍, 庄大方, 熊利亚. 北京周边沙源区沙化土地光谱特征初探. 地理研究, 2002, 21(5): 599-607. [Li Haiping, Zhuang Dafang, Xiong Liya. A tentative study on the spectral characteristics of desertified land round Beijing area. Geographical Research, 2002, 21(5): 599-607.]
- [40] Baldocchi D D, Xu L, Kiang N. How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 123(1-2): 13-39.
- [41] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应. 地理研究, 2012, 31(1): 71-81. [Yang Lei, Wei Wei, Chen Liding, et al. Soil desiccation in deep soil layers under different vegetation types in the semi-arid loess hilly region. Geographical Research, 2012, 31(1): 71-81.]

The contributions of leaf area index and precipitation to surface energy balance in the process of land cover change

LIU Fengshan^{1,2}, TAO Fulu¹, XIAO Dengpan³, ZHANG Shuai¹, WANG Meng^{1,2},
ZHANG He^{1,2}, BAI Huizi^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China)

Abstracts: Leaf area index (LAI), which has interaction with a variety of elements such as precipitation in the process of land use and cover change, is an important influencing factor of the surface energy balance. But its contribution to the surface energy balance in the process of land use and cover change is unclear. This article emphatically isolated the impact of LAI on surface energy balance, in order to recognize the relative role of land cover and LAI in surface energy balance. The research objects include: three kinds of land cover, i.e. farmland, forest and grassland in northeast China, the corresponding LAI monthly data (annual average 1.21, 1.64 and 0.73 (m^2m^{-2}), respectively), and three arbitrary kinds of precipitation amount (double, normal and half) in 2003. Firstly the Simple Biosphere model 2 had been validated against net radiation, sensible heat, latent heat, and temperature at the study sites, and showed well performance on yearly change trends. Then the effects on surface energy balance of different combinations of land cover and LAI data under different rain amount conditions were studied using the model. We found that, (1) land cover change had the biggest impacts on net radiation, with annual average (Wm^{-2}) about 14.5 compared with less than 1.57 and 0.49 for LAI and precipitation influence; (2) LAI mainly altered the partitioning of net radiation into latent and sensible heat flux, i.e. bigger LAI obviously increased (decreased) the ratio of latent (sensible) heat flux in net radiation at farmland and grassland, and LAI variation had less influence on latent and sensible heat flux at forest; (3) precipitation played an important role in net radiation partitioning, that is latent heat flux increased with more precipitation, but half times precipitation amount had more sharp effect than double times precipitation amount; (4) surface soil moisture was regulated by precipitation and LAI, and had an opposite variation tendency against latent heat. We also showed that the relationships between LAI and surface energy balance components at monthly scale were coincident with that at yearly scale. Our results proved the importance of LAI in surface energy partitioning into latent and sensible heat flux in the process of land use and cover change.

Key words: LAI; surface energy balance; land use and cover change; SiB2; soil moisture; latent heat flux