

基于 Granger 模型的黄土沟壑区典型人工林绿水流研究

符冲¹, 宋孝玉¹, 李蓝君¹, 赵新凯¹, 李怀有²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,

陕西 西安 710048; 2. 黄河水利委员会 西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: [目的] 对黄土沟壑区典型人工林刺槐、侧柏、油松的绿水流变化规律进行研究, 为该区植树造林, 促进水资源高效利用等工作提供科学指导。[方法] 首先对 Granger 模型在南小河流域典型人工林内的适用性进行评价, 然后结合实测的低效绿水, 对各林地内高、低效绿水进行了分离, 并基于分离结果, 分析总结无雨期各林地高、低效绿水变化特征及其与太阳辐射、叶面积指数、土壤含水率的关系。[结果] ① Granger模型在各林地内的适用性良好, 其纳什效率系数在率定期以及验证期分别在 0.67 以及 0.52 以上。② 各林地中, 高效绿水在不同水文年的变化程度表现为: 侧柏(45.93%) > 油松(28.81%) > 刺槐(6.11%); 低效绿水变化则表现为: 油松(52.73%) > 侧柏(34.97%) > 刺槐(21.16%); 绿水流变化表现为侧柏(21.13%) > 刺槐(12.37%) > 油松(0.50%)。偏枯和特枯年份无雨期刺槐、侧柏、油松林地 10 cm 土层相对含水量低于 50% 的比例占 90.1%, 56.8%, 64.0% 和 68.4%, 70.1%, 71.2%; 20 cm 土层相对含水量低于 50% 的占 90.1%, 61.0%, 60.1% 和 80.0%, 66.7%, 50.5%。[结论] ① 侧柏是对水分最敏感的树种。② 不同水文年对侧柏高效绿水(45.93%) 的影响大于低效绿水(34.97%), 对刺槐和油松的影响则正好相反。③ 太阳辐射对侧柏低效绿水的影响最大, 对刺槐高效绿水影响最大。刺槐和油松的低效绿水都随叶面积指数的增加而减少, 高效绿水则随之增加。侧柏的高效绿水受叶面积指数影响较小。3 种林地 在 试 验 期 大 部 分 时 段 内 都 处 于 中 度 缺 水 状 态。

关键词: Granger 模型; 黄土沟壑区; 典型人工林; 绿水流分离; 水量平衡

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0014-09

中图分类号: S715.4

文献参数: 符冲, 宋孝玉, 李蓝君, 等. 基于 Granger 模型的黄土沟壑区典型人工林绿水流研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 14-22. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200925.001; Fu Chong, Song Xiaoyu, Li Lanjun, et al. Green water flow in typical artificial forest in loess gully region based on Granger model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 14-22.

Green Water Flow in Typical Artificial Forest in Loess Gully Region Based on Granger Model

Fu Chong¹, Song Xiaoyu¹, Li Lanjun¹, Zhao Xinkai¹, Li Huaiyou²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an

University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Xifeng Experiment Station of

Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: [Objective] In order to guide local afforestation and promote efficient use of water resources, the green water flow of the typical artificial forest of *Robinia pseudoacacia*, *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* was studied in the loess gully region. [Methods] The applicability of Granger model in typical artificial forest land in Nanxiaohegou sub-basin was evaluated. Then combined with the measured green water of low efficiency, the high and low efficiency green water in each forest was separated. And based on the separation results, we analyzed and summarized the characteristics of high and low efficiency green water changes in various forest land during the rain free period and their relationships with solar radiation, leaf area index, and soil moisture content. [Results] ① The Granger model has good applicability in various forest

收稿日期: 2020-07-26

修回日期: 2020-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原沟壑区绿水的水文过程及其对土地利用和气候变化的响应”(41771259); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“黄土高原沟壑区绿水的水文过程及其与植被类型的耦合关系”(2019JZ-45)

第一作者: 符冲(1996—), 男(汉族), 山西省永济市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。Email: 1803799439@qq.com。

通讯作者: 宋孝玉(1971—), 女(汉族), 陕西省安康市人, 博士, 教授, 主要从事水文学及水资源方面的研究。Email: songxy@xaut.edu.cn。

lands, and its Nash efficiency coefficient was above 0.67 and 0.52 in the regular period and verification period. ② In each forest land, the change of high efficiency green water in different hydrological years was *Platycladus orientalis* (45.93%) > *Pinus tabulaeformis* (28.81%) > *Robinia pseudoacacia* (6.11%). The change of low efficiency green water is *Pinus tabulaeformis* (52.73%) > *Platycladus orientalis* (34.97%) > *Robinia pseudoacacia* (21.16%). And the change of green water flow was *Platycladus orientalis* (21.13%) > *Robinia pseudoacacia* (12.37%) > Chinese pine (0.50%). *Robinia pseudoacacia*, *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* forest land with 10 cm relative water content less than 50% were 90.1%, 56.8%, 64.0% during dry year, and 68.4%, 70.1%, 71.2% during extremely dry year; 20 cm relative water content less than 50% are 90.1%, 61.0%, 60.1%, and 80.0%, 66.7%, 50.5%. [Conclusion] ① *Platycladus orientalis* was the most sensitive tree species for water. ② Different hydrological years have a greater impact on the high efficiency green water (45.93%) of *Platycladus orientalis* than the low-efficiency green water (34.97%), and the opposite was true for *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis*. ③ Solar radiation had the greatest impact on the low efficiency green water in *Platycladus orientalis*, and the greatest impact on the high efficiency green water in the *Robinia pseudoacacia* forest. The low efficiency green water of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* decreased with the increase of leaf area index while the high efficiency green water increased. The high-efficiency green water of *Platycladus orientalis* was less affected by the leaf area index. The three forest land was in a state of moderate water shortage during most of the experiment period.

Keywords: Granger model; loess gully region; typical artificial forest; green water flow separation; water balance

绿水是通过蒸散过程而流向大气圈的水汽流,绿水资源中的绿水流即为实际蒸散发的总量^[1]。蒸散发作为能量交换和水文循环的参与者,是土壤—植被—大气连续体 (SPAC) 系统中必不可少的一个环节^[2]。蒸散发包括土壤蒸发和植物蒸腾,其中,土壤蒸发被认为是绿水资源中的低效绿水,植物蒸腾则被认为是绿水资源中的高效绿水^[3]。黄土高原地区多为干旱或半干旱气候,干旱作为主要的气象灾害,长期严重制约该区域内农业生产和生态恢复^[4]。同时,受气候特征和下垫面条件综合作用,水土流失也一直是该地区亟待解决的关键问题。针对此种情况,国家大力推广植树造林、退耕还林工程,并取得了显著的生态效益^[5],但在造林过程中,由于未切合实际的考虑到当地水资源以及树种耗水的匹配特点,亦出现了林木存活率低或树干呈现“半生半死”等不良现象,导致植树造林效率大大降低^[5-7]。因此,有必要对黄土区典型人工林地绿水流变化及其影响因素进行研究,这对于充分利用绿水资源以及促进人工林地的有效管理等均具有重要作用^[5-6]。目前,模拟绿水流变化的模型较多应用于大尺度上^[8-10],对小尺度方面关注较少,而且对于干旱、半干旱地区高、低效绿水进行分离的相关报道较少。现有方法多基于水量平衡、能量平衡等原理发展而来,主要有 Penman 公式^[11]、修正 Penman 公式^[12]、Penman-Monteith 公式^[13]、Shut-

tleworth-Wallace 模型^[8]、双作物系数法^[14]、互补相关模型等^[15]。其中, Penman 类模型对数据要求较为严格,除了常规气象资料外,还需要较多的植被参数,这些植被参数往往难以获取或者取值精度不高,使该类模型在资料缺乏区域难以推广应用;相对而言,基于互补相关原理的 Granger 模型仅需要气象资料即可计算出绿水流,应用相对简便,方便于小区域尺度的蒸散发变化和绿水研究。在绿水流动态性研究方面,目前研究对象多为小麦 (*Triticum aestivum*)^[16]、大豆 (*Glycine max*)、玉米 (*Zea mays*)、水稻 (*Oryza sativa*)^[17],对黄土沟壑区典型人工林刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 的研究较为缺乏;而且现有研究进行绿水流变化探讨时,时间尺度多以整年或者整月为主^[18],针对短时段内变化特征进行的研究也较少。因此,本文以黄土沟壑区典型小流域内人工刺槐、侧柏和油松林地研究对象,在偏枯年份 (2016 年) 和特枯年份 (2017 年) 野外监测的基础上,首先对 Granger 模型在多样地内的适用性进行评价,然后结合实测的低效绿水,对多样地内高、低效绿水进行分离,基于分离结果,对无雨期各林地的高、低效绿水与太阳辐射、叶面积指数、土壤含水率的关系进行分析,以为黄土沟壑区典型人工林地绿水资源的合理利用、植树造林生态效益的提升以及人工林地的系统管理等提供科学参考与指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

南小 河 沟 流 域 (35°41′—35°44′N, 107°30′—107°37′E) 位于 蒲 河 下 游、董 志 源 西 侧,流 域 内 建 有 黄 河 水 利 委 员 会 西 峰 水 土 保 持 科 学 试 验 站。流 域 面 积 36.3 km²,海 拔 1 050—1 423 m,沟 壑 密 度 为 2.68 km/km²,沟 道 比 降 2.8‰。地 形 地 貌 主 要 由 塬 面、坡 地、沟 谷 组 成,具 有 典 型 的 黄 土 沟 壑 区 地 貌 特 征。流 域 处 于 半 干 旱 地 带,多 年 平 均 降 雨 量 为 544.8 mm,

多 年 平 均 气 温 为 9.3 ℃,平 均 日 最 高 气 温 为 28.8 ℃,平 均 日 最 低 气 温 为 -22.6 ℃。流 域 内 降 雨 量 集 中 在 5—9 月,占 全 年 的 70% 以 上,并 多 以 大 雨、暴 雨 的 形 式 发 生。土 壤 类 型 主 要 以 黑 垆 土、黄 绵 土 为 主,容 重 分 布 在 1.25~1.45 g/cm³。

流 域 内 无 天 然 林 分 布,人 工 林 主 要 是 刺 槐、侧 柏 和 油 松,草 被 群 落 主 要 是 白 羊 草、艾 蒿 和 苜 蓿。经 过 实 地 考 察,选 择 研 究 区 内 树 龄 基 本 一 致,长 势 较 为 良 好 的 刺 槐、侧 柏 及 油 松 林 地 作 为 试 验 样 地,试 验 样 地 基 本 情 况 详 见 表 1。

表 1 试 验 样 地 基 本 情 况

树 种	树 龄/a	树 高/cm	胸 径/cm	冠 幅/cm	位 置	坡 向	坡 度	土 壤 类 型
刺 槐	35	544.1±27.6	16.2±1.9	288.5±16.2	杨 家 沟	阴 坡	24	粉 壤 土
侧 柏	35	475.6±29.2	18.4±2.8	215.4±11.1	常 青 山	阴 坡	23	粉 壤 土
油 松	35	455.8±25.8	16.5±1.9	193.1±11.9	魏 家 台	阴 坡	13	粉 壤 土

1.2 试 验 设 计

试 验 于 2016 年 4 月 15 日 至 10 月 15 日 及 2017 年 4 月 15 日 至 10 月 15 日 在 南 小 河 沟 流 域 各 样 地 内 进 行,观 测 及 测 定 项 目 主 要 包 括 土 壤 含 水 率、土 壤 田 间 持 水 量、土 壤 蒸 发、植 被 叶 面 积 指 数 (LAI) 等。土 壤 含 水 率 使 用 管 式 时 域 反 射 系 统 (Trime TDR, Germany) 测 量,测 量 间 隔 为 3~5 d,测 量 深 度 为 200 cm,深 度 0—100 cm 时 间 隔 深 度 为 10 cm,100—200 cm 时,间 隔 深 度 为 20 cm。土 壤 田 间 持 水 量 使 用 环 刀 法 进 行 测 定。土 壤 蒸 发 采 用 自 制 的 微 型 蒸 渗 仪 (深 度 20 cm,口 径 16 cm) 进 行,测 量 间 隔 为 3~5 d;降 雨 及 气 象 数 据 (太 阳 辐 射、温 度、湿 度、2 m 处 风 速 等) 利 用 WatchDog 2009 系 列 气 象 观 测 系 统 进 行 监 测。LAI 则 使 用 植 物 冠 层 分 析 系 统 (WinScanopy 2006, Canada) 进 行 定 点 观 测,观 测 间 隔 为 6~7 d。

1.3 互 补 相 关 原 理 及 Granger 模 型

互 补 相 关 理 论 是 Bouchet^[19] 提 出 的 一 种 计 算 区 域 绿 水 流 的 理 论 模 型。他 认 为 在 充 分 湿 润 时,绿 水 流 (ET_a) 是 和 潜 在 蒸 散 量 (ET_p) 相 等 的,都 为 湿 润 环 境 的 蒸 散 量 (ET_w)。但 是 随 着 水 分 减 少,ET_a 会 随 之 减 小,而 原 来 用 于 蒸 散 的 能 量 也 不 会 消 失,被 用 来 改 变 该 区 域 温 度、湿 度 等,即 用 来 增 加 ET_p,且 其 增 加 量 应 该 和 剩 余 的 原 来 用 于 蒸 散 的 能 量 相 等。公 式 (1) 表 示 充 分 湿 润 时 ET_a 和 ET_p 之 间 的 关 系:

$$ET_a + ET_p = 2ET_w \quad (1)$$

在 此 基 础 上,Granger 等 引 入“相 对 蒸 散 发”的 概 念 并 重 新 定 义 了 可 能 蒸 散 发 和 湿 润 环 境 蒸 散 发^[20],最 终 推 导 出 估 算 绿 水 流 的 关 系 式,即:

$$ET_a = \left[\frac{\Delta}{\gamma} R (R_n - G) + R \cdot E_a \right] / \left(\frac{\Delta}{\gamma} R + 1 \right) \quad (2)$$

式 中:ET_a 为 绿 水 流 (mm); Δ 为 温 度—饱 和 水 气 压 曲 线 斜 率 (mbar/℃); R_n 为 太 阳 净 辐 射 (W/m²); G 为 土 壤 热 通 量 (W/m²); R 为 相 对 蒸 散 发; γ 为 干 湿 计 常 数 (mbar/℃),取 值 为 0.658 (mbar/℃); E_a 为 干 燥 力 项 (W/m²),它 们 与 干 燥 力 D 之 间 的 关 系 式 为:

$$R = \frac{1}{1 + b_2 \exp(b_1 D)} \quad (3)$$

$$D = \frac{E_a}{R_n - G + E_a} \quad (4)$$

式 中:b₁, b₂ 为 经 验 系 数,Granger 根 据 不 同 下 垫 面 观 测 资 料^[20],分 析 认 为 b₁ 和 b₂ 取 值 分 别 为 8.045,0.028。

1.4 水 量 平 衡 法

利 用 实 测 的 刺 槐、油 松、侧 柏 林 地 的 土 壤 含 水 率,根 据 水 量 平 衡 原 理 计 算 试 验 期 间 样 地 的 绿 水 流:

$$ET_a = W_1 - W_2 + P - I - R \quad (5)$$

式 中:W₁ 为 前 一 次 测 量 的 土 壤 含 水 量; W₂ 为 后 一 次 测 量 时 的 土 壤 含 水 量; P 为 前 后 两 次 测 量 期 间 的 降 雨 量; I 为 截 留 量; R 为 径 流 量,该 式 中 变 量 单 位 均 为 mm。

根 据 课 题 组 在 南 小 河 沟 流 域 进 行 的 相 关 研 究^[3],刺 槐、侧 柏 及 油 松 冠 层 截 流 比 例 大 致 保 持 在 13%,20% 以 及 18%。由 于 本 研 究 试 验 样 地 和 其 试 验 样 地 在 立 地 条 件、植 被 密 度、土 壤 性 质 等 方 面 十 分 接 近,故 本 研 究 直 接 采 用 其 成 果 进 行 林 地 截 流 量 的 计 算。同 理,试 验 期 内 径 流 量 采 用 李 森^[21] 所 拟 定 的 南 小 河 沟 流 域 林 地 产 流 方 程 进 行 计 算。

1.5 模 型 评 价 标 准

以 2016 年 为 率 定 期,将 Granger 模 型 计 算 的 绿

水流与水量平衡法计算结果进行对比, 通过手工试错法调整模型参数, 使模拟结果与实测结果接近。采用率定后的模型参数, 以 2017 年为验证期对模型进行验证。率定与验证模型时, 以纳什效率系数 (NSE)^[22] 对模型模拟精度进行评价:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \quad (6)$$

式中: P_i 为 Granger 模型模拟的绿水流; O_i 为试验测定的绿水流; O_{avg} 为试验测定绿水流的平均值。NSE 越接近于 1, 说明模拟值与实测值的拟合程度越好, 即适用性越好。一般而言, NSE 大于 0.5 则表示模型模拟精度良好, 处于可接受的范围; NSE 大于 0.7 表示模型模拟精度较高^[23]。

1.6 绿水流分离

使用经过验证后的 Granger 模型计算绿水流, 减

去刺槐、侧柏、油松林地实测的低效绿水, 即可计算得到刺槐、侧柏、油松林地的高效绿水。

2 结果与分析

2.1 模型参数率定

模型参数率定后的结果详见表 2。参数率定后, 模型模拟效果如图 1—2 所示, 可以看出, 率定期模型在刺槐、侧柏、油松林地内的 NSE 分别为 0.72, 0.70 和 0.67, 在验证期则分别为 0.56, 0.52, 0.58。整体来看, 率定参数后的 Granger 模型对各样地内绿水流的模拟效果较好, 可用于进行日尺度的绿水流计算。

表 2 试验样地 Granger 模型绿水流模拟参数率定结果

参数	优化前	优化后		
		刺槐	侧柏	油松
b_1	8.045	9.862	9.956	9.975
b_2	0.028	0.038	0.040	0.039

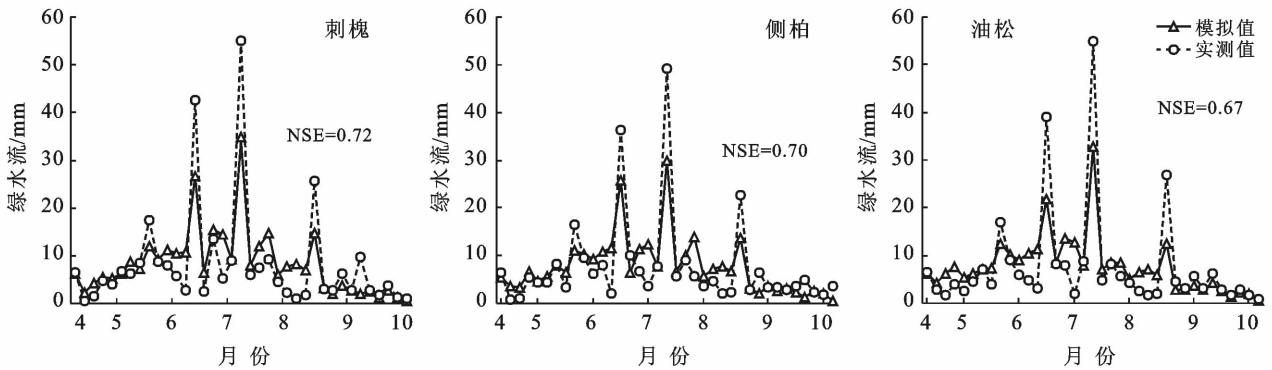


图 1 率定期 (2016 年) Granger 模型模拟不同林地绿水流效果

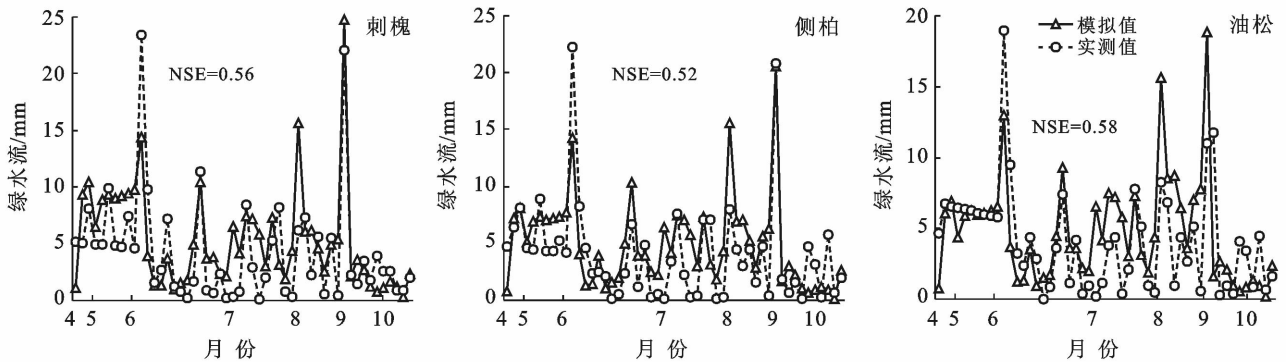


图 2 验证期 (2017 年) Granger 模型模拟不同林地绿水流效果

2.2 样地尺度高低效绿水关系分析

利用多元非线性回归模型进行绿水流及其影响因素关系的拟合, 即将低效绿水 (E) 或高效绿水 (T) 分别与太阳净辐射 (R_n)、土壤含水率 (θ)、叶面积指数 (LAI) 建立函数关系。建立方程时, 不仅考虑各单因子对 E 和 T 影响, 同时也考虑各因子之间的交互影

响作用。方程具体形式为:

$$E(T) = a_i R_n^{n_1} + b_i \theta^{n_2} + c_i LAI^{n_3} + d_i \theta \times LAI + e_i R_n \times LAI + f_i R_n \times \theta + g_i R_n \times \theta \cdot LAI + h_i \quad (7)$$

式中: $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, n_1, n_2, n_3$ 均为待定系数。考虑到 E 主要发生在表层土壤, 因此, 建立函数

关系时 θ 分别采用 0, 10 以及 20 cm 土层含水率分别进行拟合。对 T 而言, 则采用 0, 10, 20, 30 和 40 cm 土层的 θ 来分别建立函数关系。

经多次试算, 最后确定 $n_1 = 1, n_2 = 2, n_3 = 1$ 。采用不同深度含水率建立的回归方程决定系数(表 3—4)。

表 3 各林地低效绿水方程决定系数 R^2

土层深度/cm	刺槐			侧柏			油松		
	0	10	20	0	10	20	0	10	20
R^2	0.31	0.44	0.39	0.39	0.64	0.42	0.49	0.57	0.41

表 4 各林地高效绿水方程决定系数 R^2

土层深度/cm	刺槐					侧柏					油松				
	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
R^2	0.43	0.42	0.62	0.33	0.34	0.42	0.55	0.57	0.53	0.52	0.49	0.49	0.63	0.48	0.48

2.3 各因子对绿水流的影响分析

由于降雨量大小会影响各因子对绿水流的贡献度, 因此, 在对各影响因素进行分析前, 需要确定 2016 和 2017 年的丰枯程度。根据气象科学研究院拟定的降雨量 5 级判别标准, 本研究采用降雨量距平

可以看出, 在其他因素确定的情况下, 低效绿水对 10 cm 土壤含水量敏感, 而高效绿水对 20 cm 土壤含水量敏感。采用以上两深度进行方程拟合时, 低效绿水方程的决定系数在刺槐、侧柏及油松林地内为 0.44, 0.64, 0.57; 对高效绿水而言, 则分别为 0.62, 0.57, 0.63。

百分率(P_a)来进行水文年份的判别(表 5)^[24]。结合 2016 与 2017 年降雨量(397.6 与 217.8 mm)得到, 研究区域 2016 年降雨量距平百分率 $P_{a2016} = -27\%$, 2017 年降雨量距平百分率 $P_{a2017} = -60\%$, 因此, 2016 年是偏枯年份, 2017 年是特枯年份。

表 5 水文年份判别标准

项目	降雨量距平百分率 P_a				
	$P_a < -40\%$	$-40\% < P_a < -15\%$	$-15\% < P_a < 15\%$	$15\% < P_a < 40\%$	$P_a > 40\%$
水文年份	特枯年	偏枯年	平水年	偏丰年	特丰年

2.3.1 叶面积指数(LAI) 图 3 表示不同林地不同年份无雨期内(一般为 4 d)低效绿水(E)和高效绿水(T)随叶面积指数(LAI)变化。由图 3 可以看出, 刺槐、侧柏、油松林地的 E 值在偏枯年(2016 年)分别分布在 0.13~7.45, 0.08~4.22 mm 以及 0.18~7.63 mm, 日平均 E 值分别为 1.86, 1.91 以及 1.06 mm/d; 在特枯年(2017 年), E 值则分布在 0.47~6.31 mm, 0.36~7.36 mm 以及 0.01~9.88 mm, 日均 E 分别为 1.59, 1.84, 2.47 mm/d。对比分析可以看出, 不同水文年刺槐林地低效绿水变化幅度较小, 其次是油松, 而侧柏变化最敏感, 其最大 E 在不同水文年变化比例超过了 70%。

对 T 而言, 刺槐、侧柏、油松林地的 T 在偏枯年(2016 年)分别分布在 0.04~16.07, 0.11~18.48 mm 以及 0.05~16.49 mm, 日均 T 分别为 4.01, 4.62 以及 4.12 mm/d 左右; 在特枯年(2017 年), T 则分布在 0.63~14.85, 0.27~9.59 mm 以及 0.09~10.44 mm, 日均 T 为 3.71, 2.40, 2.61 mm/d。可以看出, 不同水文年对侧柏的高效绿水影响最大, 次之油松, 对刺

槐的影响是最小的。

就绿水流而言, 刺槐、侧柏、油松林地偏枯年份和特枯年份的绿水流分别为 181.9, 193.1, 178.3 和 159.4, 152.3, 179.2 mm; 各样地不同水文年无雨期间绿水流变化表现为: 侧柏(21.13%) > 刺槐(12.37%) > 油松(0.50%), 结合高低效绿水的变化情况可知侧柏是对水分最敏感的树种, 油松是不同水文年绿水流变化最小的树种。

纵观三样地叶面积指数的变化可知, 随着叶面积指数的增大, 刺槐林地 E 在偏枯年份和特枯年份均呈下降的趋势, T 则呈现增大的趋势; 相比之下, 在特枯年份, 叶面积指数较小时 T 即会达到峰值。侧柏 E 随着叶面积指数的增大呈下降趋势, T 则呈现波动变化, 出现了几个大小不一的峰值。油松 E 随着叶面积指数的增大同样呈下降趋势, T 则呈现稳定的上升趋势。树种间对比可以看出, 叶面积指数对侧柏的影响最不稳定, 这说明侧柏对水分较为敏感, 因此, 其 LAI 的增加会导致 E, T 间比例关系的不稳定所致。

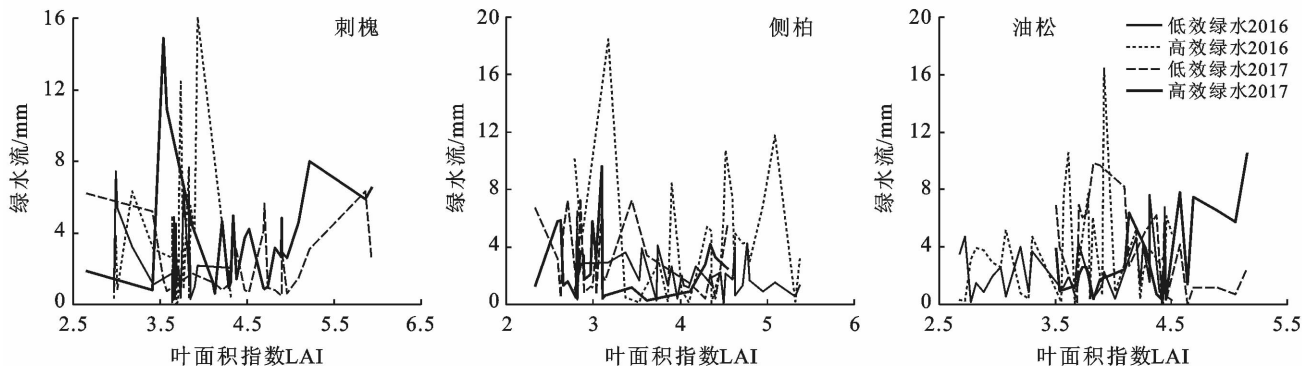


图 3 不同林地高、低效绿水流随叶面积指数变化过程

2.3.2 太阳净辐射(R_n) 图 4 为不同林地低效绿水(E)和高效绿水(T)随太阳净辐射(R_n)变化图。可以看出,偏枯年(2016年) R_n 相对比较充足,随其增大,各林地的 E, T 均呈现出明显的波动上升趋势。但是在特枯年(2017年), R_n 较小时,即可使 T 达到峰值。对各林地进行对比,可以看出,在偏枯年份,侧柏 E 的

最大值出现所对应的 R_n 最小,而刺槐和油松则保持相对一致;在特枯年份,刺槐 E 的最大值所对应的 R_n 最小,油松次之,侧柏最大。对 T 而言,偏枯年份和特枯年份刺槐 T 最大值对应的 R_n 都较小,侧柏和油松保持一致。对比分析可以看出, R_n 对侧柏林地 E 的影响最大,对刺槐林地的 T 影响最大。

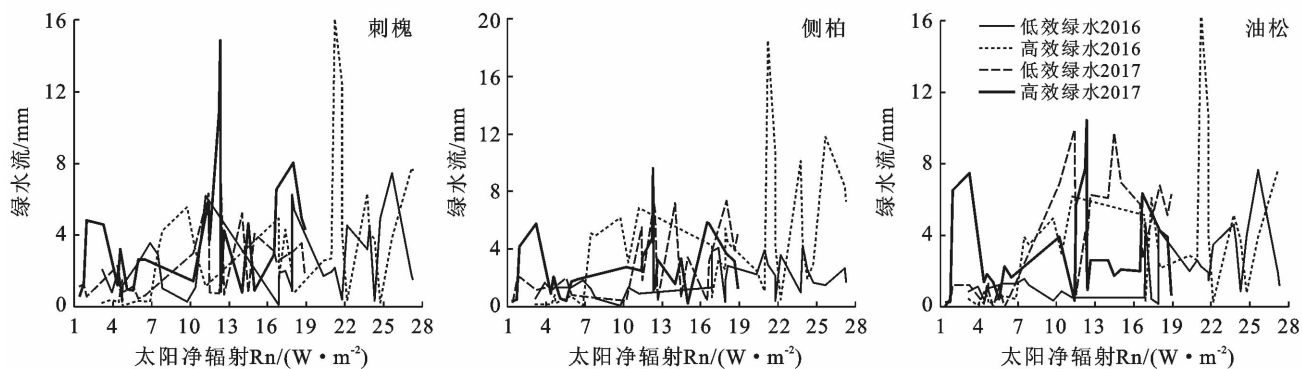


图 4 不同林地高、低效绿水流随太阳净辐射变化

2.3.3 土壤含水率(θ)

(1) 对低效绿水的影响。图 5 是不同林地低效绿水(E)随 10 cm 土壤含水率($\theta_{10\text{cm}}$)变化图。由图 5 可以看出, E 整体随着 $\theta_{10\text{cm}}$ 的增大而增大。在偏枯年份(2016年), E 总量表现为刺槐(75.6 mm) $>$ 油松(64.1 mm) $>$ 侧柏(59.2 mm),在特枯年份(2017年), E 总量表现则为油松(97.9 mm) $>$ 侧柏(79.9 mm) $>$ 刺槐(59.6 mm)。对比分析可知,不同水文年油松低效绿水的变化最大(52.73%),侧柏次之(34.97%),对刺槐的影响最小(21.16%)。根据田间持水量试验中测定的 0—40 cm 土壤的田间持水量,设定 4 个土壤水分梯度,分别为:充分供水($>75\%$ 田间持水量),轻度缺水(50%~75%田间持水量),中度缺水(25%~50%田间持水量),重度缺水($<25\%$ 田间持水量)。相对含水量指土壤含水量占田间持水量的百分比,3 块林地对比可知,偏枯年份刺槐林地 10 cm 相对含水

量集中保持在 26.5%~35.2%之间,特枯年份保持在 35.5%~54.4%之间;偏枯年份侧柏相对含水量集中保持 38.8%~56.5%之间,特枯年份保持在 26.4%~56.4%之间;偏枯年份油松 10 cm 相对含水量集中保持 37.4%~52.7%之间,特枯年份保持在 37.2%~59.9%之间。可以看出,在枯水年不同时期林地土壤水分大多都保持在田间持水量的 60%以下,但是幼苗存活重要条件之一是土壤含水量至少要保持在田间持水量的 50%以上^[25],侧柏幼苗甚至要保持在 70%~80%才是最适宜的水分环境^[26]。试验期中的无雨期间,两种水文年份下,刺槐林地相对含水量低于 50%的占 90.1%和 56.8%;侧柏为 64.0%和 68.4%;油松是 70.1%和 71.2%,大部分时期人工林地都处于中度缺水状态,即存在着水分不足进而而限制树木生长的现象,这是导致树苗成活率低的一个重要原因。

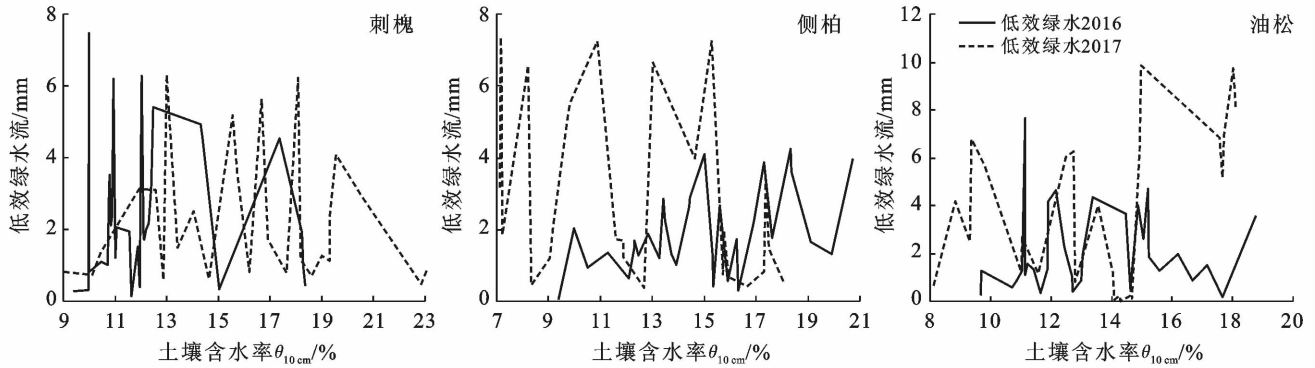


图 5 不同林地低效绿水流随 10 cm 土壤含水率变化过程

(2) 对高效绿水的影响。图 6 是不同林地高效绿水(T)随 20 cm 土壤含水率($\theta_{20\text{cm}}$)变化图。由图 6 可以看出,随着 $\theta_{20\text{cm}}$ 的增大,各样地不同年份林木的 T 都呈下降趋势。在偏枯年份(2016 年)无雨期内, T 总量表现为:侧柏(133.9 mm) > 油松(114.2 mm) > 刺槐(106.3 mm),在特枯年(2017 年),则表现为刺槐(99.8 mm) > 油松(81.3 mm) > 侧柏(72.4 mm)。对比分析可以看出,不同水文年侧柏林地内 T 的变化幅度最大(45.93%),油松次之(28.81%),刺槐最小(6.11%)。3 块林地对比可知,偏枯年份刺槐林地

20 cm 相对含水量集中保持在 26.9%~39.9% 之间,特枯年份保持在 43.3%~65.1% 之间;偏枯年份侧柏林地相对含水量集中保持 40.4%~59.4% 之间,特枯年份保持在 30.8%~52.3% 之间;偏枯年份油松林地相对含水量集中保持 42.2%~52.4% 之间,特枯年份保持在 41.7%~56.4% 之间。两种水文年份下,刺槐林地 20 cm 相对含水量低于 50% 的占 90.1% 和 61.0%;侧柏为 60.1% 和 80.0%;油松是 66.7% 和 50.5%。三片林地大多处于中度缺水状态,只有极少一部分时间处于轻度缺水状态。

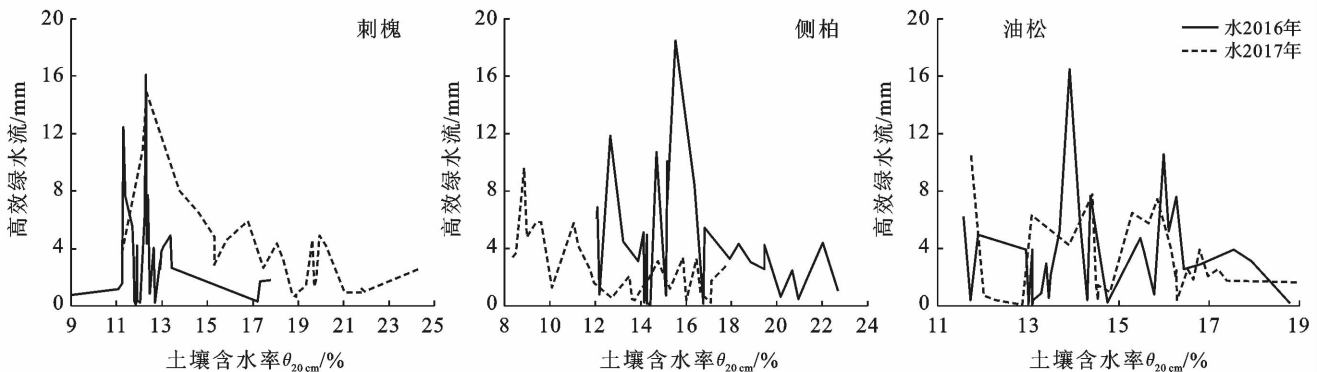


图 6 不同林地高效绿水流随 20 cm 土壤含水率变化过程

3 讨论与结论

水分胁迫是植物正常生长和发育过程中最容易受到的非生物环境胁迫因子,水分的供给情况往往成为限制植物生长以及成林的重要因素^[27-28]。土壤水分缺乏的情况最容易出现在无雨期阶段,在黄土高原,如何保证人工林在无雨期间的存活率是保证人工林存活的关键。对主要造林树种在无雨期间绿水流变化研究的首要问题就是进行绿水流的分离。本研究结果表明,率定后的基于互补相关原理的 Granger 模型在南小河沟的适用性良好,在率定期纳什效率系数均在 0.7 左右,在验证期也都超过了 0.5,表明模拟

结果较好,在数据不足或者缺失的小流域可用来模拟绿水流的变化情况。Xu 等^[29]指出互补相关模型在率定参数后可以在各气候区得到理想的蒸散量,这与本研究结果一致。

本研究的结果表明, E 对 10 cm 土壤含水率敏感, T 对 20 cm 土壤含水率敏感。宋孝玉等^[24]研究表明, E 与土壤表层含水率有较大关系,这与本研究结果一致。王健等^[30]认为, T 与 40 cm 土壤含水率相关性较好,与本研究不一致,这是由于在南小河沟流域,降雨多以大雨、暴雨形式发生,但持续时间短,因此,更多的降雨来自小于 10 mm 的小雨,这种小雨一般只能影响到表层(0—10 cm)或次表层(10—20 cm)

的土壤含水率^[31-32],对 40 cm 土壤含水率的影响较小,所以本研究中 T 表现出对 40 cm 土壤含水率不如对 20 cm 土壤含水率更为敏感。

本研究表明,侧柏的 T 受 LAI 影响较小,而刺槐、油松的 E , T 以及侧柏的 E 都受 LAI 影响较大。相对而言, R_n 对侧柏林地的 E 影响最大,对刺槐林地的 T 影响最小。不同水文年油松 E 的变化最大,侧柏次之,刺槐最小。不同水文年侧柏 T 变化幅度最大,刺槐次之,油松最小。对比 E 和 T 的变化可知,不同水文年对侧柏 T 的影响大于 E ,对刺槐和油松则正好相反。各树种中,侧柏对水分最敏感。这与以往的结果不一致^[33],这是因为从幼苗开始,侧柏就需要土壤水分保持在田间持水量的 70%~80% 才能正常生长^[26],而且侧柏根系分布在 0—90 cm,主要分布在 0—40 cm,刺槐根系分布在 0—120 cm 且呈均匀分布^[33],本研究所用的水文年份为偏枯年份和特枯年份,降雨量距平百分率 $P_{a2016} = -27\%$, $P_{a2017} = -60\%$,差异较大,在特枯年份几场大暴雨的存在就决定了当年大部分的降雨量,大暴雨可以补充刺槐林地的深层土壤水分,对刺槐而言,由于根系均匀分布,其可以将深层土壤水分转化成高低效绿水;而侧柏由于根系的集中分布导致其对深层水的利用相对困难,因此,其绿水流少于刺槐。由绿水流总量可知,偏枯年份到特枯年份,油松林地绿水流总量相对稳定,这与以往的研究基本一致^[5,34]。同时,刺槐相比侧柏也较为稳定,这主要是因为刺槐林地穿透雨量多于侧柏^[3],降雨对刺槐林地土壤水分的补充较为充足,使得刺槐根系所受的水分胁迫程度低于侧柏。

对土壤水分析可知,3 种林地大部分阶段都处于中度缺水状态,存在着水分不足进而限制树木生长的现象,这意味着绿水资源对树种生长的支持程度有所欠缺,因此,对这 3 种树种而言,植树造林时,要将人工林密度控制在土壤水分对应的植被承载能力内。同时,也应通过改善林下植被层次以及枯落物覆盖等的影响,来尽量减少 E ,促使 E 朝着 T 转化,从而促进绿水资源更有效的利用。

[参 考 文 献]

- [1] 程国栋,赵文智. 绿水及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221-227.
- [2] 孙菽芬. 土壤—植被—大气统一体内水分循环和能量交换: SPAC 模型[J]. 力学进展, 1984, 14(1): 1-10.
- [3] 李蓝君. 南小河流域绿水的水文过程及其与植被类型的耦合关系[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2018.
- [4] 于学峰. 气候变暖背景下有效应对黄土高原旱涝灾害风险[N]. 中国科学报, 2019-12-03(7).
- [5] 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 等. 典型黄土区油松树干液流变化特征分析[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 349-356.
- [6] 吴旭, 陈云明, 唐亚坤, 等. 黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1176-1187.
- [7] 郭宝妮, 张建军, 王震, 等. 晋西黄土区刺槐林耗水特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2736-2741.
- [8] 高冠龙, 冯起, 刘贤德. 基于改进的双源模型模拟荒漠河岸胡杨林蒸散发[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3462-3472.
- [9] 汉光昭, 曹广超, 曹生奎, 等. 基于 Shuttleworth-Wallace 模型的小泊湖和沙柳河河源区湿地蒸散发模拟研究[J]. 湿地科学, 2019, 17(5): 519-526.
- [10] 黄葵, 卢毅敏, 魏征, 等. 土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1888-1902.
- [11] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proceedings of Royal Society (Series A), 1948, 193(1032): 120-145.
- [12] Van B. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification [J]. Water Resources Research, 1966, 2(3): 445-467.
- [13] Monteith J L. Evaporation and environment [C]. Symposia of the Society for Experiment Biology, 1965, 19: 205-234.
- [14] Zhang B Z, Liu Y, Xu D, et al. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain [J]. Irrigation Science, 2013, 31(6): 1303-1316.
- [15] 郭生练, 朱英浩. 互补相关蒸散发理论与应用研究[J]. 地理研究, 1993, 12(4): 32-38.
- [16] 刘小刚, 符娜, 李闯, 等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188-197.
- [17] 任修琳, 李宏亮, 张玉虎, 等. 2000—2015 年三江平原主要作物需水量特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 854-866.
- [18] 刘丽丽. 陕北黄土高原蒸散发变化及其影响因素研究[D]. 陕西 西安: 长安大学, 2018.
- [19] 刘绍民, 孙睿, 孙中平, 等. 基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 331-340.
- [20] Granger R J. A complementary relationship approach for evaporation from nonsaturated surfaces [J]. Journal of Hydrology, 1989, 111(1/4): 31-38.
- [21] 李森. 植被变化对南小河流域水文要素的影响[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2006: 29-31.

- [22] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models (part I): A discussion of principles. [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):82-290.
- [23] 韩金凤, 刘硕, 戴君, 等. 基于组合绿色生态措施的北方城市雨雪径流削减模拟[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2):643-650.
- [24] 宋孝玉, 王光社, 李怀有, 等. 黄土高原沟壑区绿水的水文过程及驱动机制[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 78, 183-184.
- [25] 徐彩霞. 黄土高原主要造林树种苗木根系对土壤干旱胁迫的响应机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009:10-13.
- [26] 王鑫, 余新晓, 贾国栋, 等. 不同土壤水分条件下侧柏幼苗的生理活动及氮素分配策略[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):311-317.
- [27] 王丁, 姚健, 杨雪, 等. 干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化[J]. 生态学报, 2011, 31(8):2216-2226.
- [28] 温琦, 赵文博, 张幽静, 等. 植物干旱胁迫响应的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12):11-15.
- [29] Xu C Y, Singh V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions [J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1):105-121.
- [30] 王健, 朱仲元, 宋小圆, 等. 浑善达克沙地土壤水热对黄柳蒸腾速率的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1):77-82.
- [31] 鲍彪, 毕华兴, 云雷, 等. 晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2):84-89.
- [32] 葛波, 杜妍, 常猛, 等. 不同降雨等级下杉木林土壤含水率和侧向流变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2):161-166.
- [33] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1):96-99, 107.
- [34] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20):148-159.

(上接第 7 页)

- [18] 何有华, 张晓虹, 孙浩峰, 等. 干旱风沙区水库边缘防风林带减沙效益研究[J]. 中国水利, 2018(2):36-37.
- [19] 林晨, 周生路, 吴绍华. 30 年来东南红壤丘陵区土壤侵蚀度时空演变研究: 以长汀县为例[J]. 地理科学, 2011, 31(10):1235-1241.
- [20] 吴生军. 桥子水库群沙害治理生态工程效益浅析[J]. 农业科技与信息, 2009(14):12-13.
- [21] 周杰, 王昆仑, 宋强, 等. 基于 Landsat 数据的河流流域植被覆盖率变化分析: 以杭埠—丰乐河流域为例[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(14):124-126.
- [22] 曹倩倩, 黄袁升. 基于 Landsat 影像植被覆盖度提取的研究[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2017, 31(4):74-76.
- [23] 袁士聪, 谷甫刚. 基于归一化指数 (NDVI) 的植被覆盖度分级研究: 以贵州省为例[J]. 环保科技, 2018, 24(3):38-42.
- [24] 岳玮, 刘慧明, 孙国钧. 基于遥感和 GIS 技术的祖厉河流域植被覆盖动态变化监测[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(S1):6-11, 18.
- [25] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013:360-400.
- [26] 龙雨涛, 李雪娇, 李铭, 等. 浅析不同植被在防风固沙方面发挥的生态效应[J]. 农业与技术, 2015, 35(17):76-77.
- [27] 曹华, 王晓, 陈清善. 甘肃酒泉近 50 a 气候生产潜力变化分析[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(1):89-91.
- [28] 韩娣爱. 瓜州县水资源调查评价研究[J]. 地下水, 2015, 37(6):140-142.
- [29] 陈维, 段生燕, 彭爱加. 瓜州绿洲植被退化原因及保护对策[J]. 甘肃林业科技, 2008, 33(2):46-50.
- [30] 张翼飞. 内蒙古典型草原区芨芨草适生环境研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.