

不同深度土壤水分同化产品在川西高原的应用

卢晨媛, 冯文兰, 王永前, 王浩帆, 田鹏, 卢晓宁

(成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225)

摘要: [目的] 评估不同深度土壤水分同化产品的适用性, 为川西高原有关气候变化、生态环境建设等研究提供土壤水分数据选择的科学依据。[方法] 以气象自动观测站的土壤水分值作为参考, 评价了中国气象局陆面同化系统 CLDAS-V 2.0 和全球陆面同化系统 GLDAS-Noah 土壤水分产品在川西高原的精度, 并分析了土壤水分产品对降水过程的反应以及降水对土壤水分产品精度的影响。[结果] ① GLDAS 和 CLDAS 数据均与参考值具有极显著的相关性 ($p < 0.01$), GLDAS 数据与参考值的相关性整体好于 CLDAS 数据; ② 2 套土壤水分产品在研究区表层和浅层的误差均较小, 其中, 表层土壤水分的误差大于浅层, GLDAS 数据的误差小于 CLDAS 数据。两套数据都存在对土壤水分的高估, 且在无降水情况下对土壤水分的高估比有降水的情况更突出; ③ 2 套数据在表层和浅层都表现出与降水一致的变化过程, 且土壤水分的变化均滞后于降水量的变化, GLDAS 数据对降水变化的反应比 CLDAS 数据更加灵敏, 但 CLDAS 数据因具有较高的空间分辨率而对川西高原土壤水分的空间分异特征表现得更好。[结论] 两套土壤水分产品表层和浅层数据在川西地区的适用性都较好, GLDAS 数据质量总体较 CLDAS 数据更好, 但 CLDAS 数据在对土壤水分空间分异的表现方面更具优势。

关键词: 不同深度的土壤水分; GLDAS 数据; CLDAS 数据; 适用性; 川西高原

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)01-0173-09

中图分类号: S152.7⁺1

文献参数: 卢晨媛, 冯文兰, 王永前, 等. 不同深度土壤水分同化产品在川西高原的应用[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 173-181. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.025; Lu Chenyuan, Feng Wenlan, Wang Yongqian, et al. Application of soil moisture assimilation products at different depths in Western Sichuan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 173-181.

Application of Soil Moisture Assimilation Products at Different Depths in Western Sichuan Plateau

Lu Chenyuan, Feng Wenlan, Wang Yongqian, Wang Haofan, Tian Peng, Lu Xiaoning

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: [Objective] The applicability of soil water assimilation products at different depths was evaluated to provide a scientific basis for the selection of soil water data for studies on climate change and ecological environment construction in the Western Sichuan Plateau. [Methods] Taking the soil moisture value of the automatic meteorological observation station as a reference, the accuracy of the soil moisture products of CMA land data surface assimilation system (CLDAS-V 2.0) and global land data surface assimilation system (GLDAS-Noah) in the Western Sichuan Plateau was evaluated and the response of soil moisture products to the precipitation process and the effect of precipitation on the soil were analyzed. [Results] ① GLDAS and CLDAS data had an extremely significant correlation with the reference value ($p < 0.01$), and the correlation between the GLDAS data and reference value was generally better than that of the CLDAS data. ② The errors of two sets of soil moisture products in the surface and shallow layers of the study area were small. The error of surface soil moisture was greater than that of the shallow layer, and the error of the GLDAS data

收稿日期: 2020-08-28

修回日期: 2020-10-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“山地典型生态参量遥感反演建模及其时空表征能力研究”(41631180); 四川省科技技术计划项目(20182018JY0098); 四川省教育厅项目(18ZA0110)

第一作者: 卢晨媛(1992—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 集成与气象应用。Email: 670972367@qq.com。

通讯作者: 冯文兰(1979—), 女(汉族), 四川省成都市人, 博士, 教授, 主要从事环境资源遥感研究。Email: fwl@cuit.edu.cn。

was smaller than that of CLDAS data. Both sets of data overestimated soil moisture and the overestimation of soil moisture in the case of no precipitation was more prominent than that in the case of precipitation. ③ The two sets of data showed the same change process as precipitation in the surface layer and shallow layer, and the change in soil moisture lagged behind the change in precipitation. The response of the GLDAS data to precipitation change was more sensitive than that of the CLDAS data, but the CLDAS data had better spatial resolution than the CLDAS data in the spatial distribution characteristics of soil moisture in the Western Sichuan Plateau. [Conclusion] The applicability of the two sets of soil moisture products in surface and shallow layers in Western Sichuan Plateau is good. The quality of GLDAS data is generally better than that of CLDAS data, but CLDAS data have more advantages in the performance of spatial differentiation of soil moisture.

Keywords: soil moisture at different depths; GLDAS data; CLDAS data; applicability; Western Sichuan Plateau

土壤水分是陆面过程的重要参量,是水循环的重要组成部分,在控制陆面物质和能量交换以及陆气相互作用中起到至关重要的作用^[1]。获取准确的土壤水分数据对于提升数值天气预报、短期气候预测的准确率和农作物干旱监测都具有重要的意义。土壤水分数据的获取方式主要分有地面站点观测、遥感反演、数值模拟和数据同化 4 种。其中,后 3 种可以获得大范围、连续和动态的土壤水分数据,因而,基于不同土壤水分获取方式产生了多种土壤水分产品,包括卫星产品、再分析产品和同化产品^[2]。然而,不同的土壤水分产品有各自的优缺点以及区域适用性。因此,对于不同来源的土壤水分产品适用性评估已成为土壤水分产品应用相关研究的必要内容之一。

土壤水分同化产品是利用陆面模式和数据同化技术模拟的,陆面数据同化技术能够将陆面过程模式的物理过程信息和观测资料(站点观测、遥感资料等)的实测信息进行最优组合^[3]。可以获得时空连续的高精度、高时空分辨率的剖面尺度的土壤水分数据。近年来同化土壤水分产品在气象、农业和水文领域得到了越来越多的应用。陆面数据同化的研究始于 Mc Laughlin 在 20 世纪 90 年代首次将同化方法引入到水文科学中^[4]。目前国外主流的陆面数据同化系统有全球陆面系统(GLDAS),欧洲陆面系统(ELDAS),北美陆面系统(NLDAS)等^[5],国内主要有学者李新等^[6]建立的西部陆面数据同化系统(WCLDAS)和国家气象信息中心师春香等^[7]建立的中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)2 套。目前,由于 GLDAS 数据产品可以提供全球的剖面土壤水分产品,因此在国内外的相关研究中应用比较广泛,并且在不同区域获得了两种数据产品的适用性分析结果。如,Chen 等^[8]利用青藏高原中部土壤湿度观测网数据对 GLDAS 的 4 个陆面模式的土壤湿度产品进行了评估,结果发现 4 个模式均低估了表层土壤湿度,其中,GLDAS-CLM 和 GLDAS-Noah 模式资料对 10—40 cm 土壤层湿度

代表性较好。宋海清等^[9]对比分析了 CLDAS、GLDAS1-Noah 资料和数值模式的产品 ERA-Interim 资料在内蒙古的适用性,发现 CLDAS 资料适用性更好。秦道清等^[10]基于站点观测数据评估了北京地区 CLDAS 资料 0—10 cm 土壤湿度的数据质量,发现 CLDAS 产品呈现出与观测数据大体一致的变化规律,同时得到土壤湿度与降水具有的正相关关系。在此基础上,同化土壤水分产品被广泛应用于天气和气候预报、水循环研究和水资源应用等方面的研究。如胡伟等^[11]利用 GLDAS 数据的驱动 Noah-MP 陆面模式进行了青藏高原地表能量的模拟,陈燕丽等^[12]利用 2011 年 CLDAS 数据监测和评估了广西甘蔗种植区的夏秋旱情。总的来说,不同陆面模式输出的产品都能较准确的表达区域或全球尺度土壤水分的时间和空间分异的规律,但是不同的产品在不同地区的数据适用性存在差异。因此,针对不同地区开展不同土壤水分同化产品的适用性研究很有必要。

然而,由于土壤水分具有记忆作用,这使得利用不同剖面的土壤水分研究区域短期气候变化具有非常重要的意义。因此,对不同深度的土壤水分产品的评估具有重要的现实意义。李登宣等^[13]利用 GLDAS 数据分析发现,青藏高原不同地区、不同深度层春季土壤湿度对中国东部地区的夏季降水有显著影响。然而,尽管现有的陆面数据同化系统都可以提供不同深度的土壤水分产品数据,但是近年来相关研究大多围绕表层(0—10 cm)数据的应用开展,对于深层土壤水分产品的相关应用研究较少。已有的部分成果,主要是对某一个产品的某一个特定区域的适用性的分析。如刘川等^[14]利用青藏高原中部和东部土壤湿度观测资料评估了 GLDAS 的 4 种陆面模式资料的适用性,发现 GLDAS-Noah 与观测值较为接近。为更好的利用不同陆面模式的不同深度的数据开展相关的区域研究,有必要对现有的土壤水分同化产品数据在区域的适用性开展对比研究,以获得更好的数

据。现有的剖面土壤水分产品的适应性对比评估主要围绕 GLDAS 数据提供的 4 种不同陆面模式数据结果开展,而对不同同化系统数据产品的对比分析较少。并且,研究区多集中在青藏高原地区、黄土高原地区、内蒙古地区。

川西高原地处长江中上游,草地资源丰富,生态环境独特是典型的敏感区。土壤水分是水文学和生态学重要参数之一,是气候、植被、地形、土壤及人类活动等因素的综合反映。然而,川西高原两种土壤水分同化产品的对比评估研究几乎未见报道。为此,本研究通过将 CLDAS 和 GLDAS 土壤水分同化产品数据与观测资料的对比,分析 2 种土壤水分同化产品在川西高原的可靠性,为大尺度土壤水分产品的数据质量提供区域的实证资料,也为川西高原地区相关研究选择适用的长时间不同深度的土壤水分产品提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

川西高原位于青藏高原东南缘(97°—104°E, 27°—34°N),介于青藏高原和四川盆地之间,地势西高东低,分为峡谷、高原和山地 3 种地貌类型,海拔高度 783~7 143 m。气候类型复杂多样,地带性差异和垂直变化显著,整体以寒温带气候类型为主。川西北高山高原高寒气候带,气温自东南向西北而降低,年平均气温 4~12 °C,年降水量 500~900 mm,年日照时数 1 600~2 600 h。土壤水分受土壤特性、地形、土地利用方式以及气象因子的影响,其中气象因子又包括降水、温度、蒸散、太阳辐射以及风速等。川西高原海拔差异明显,干湿季分明,降水主要集中在 6—9 月,植被类型丰富,以灌丛和草甸为主,土壤以高山草甸土为主。因此,土壤水分具有极大的变异性。

1.2 研究资料与方法

1.2.1 数据基础 由于土壤水分同化产品提供的土壤水分是总含水量(包括液态和固态),而地面观测得到的是土壤中的液态含水量,为了减小数据评估中土壤水分冻融过程对结果的影响^[14],本文选择 5—10 月非冻结期的土壤水分同化产品和气象观测站点的数据进行对比分析。

(1) 土壤水分同化产品。考虑到研究区以及数据时间范围,本文选择 CLDAS-V2.0 土壤湿度资料和 GLDAS-2.1 土壤湿度资料进行对比。

CLDAS-V2.0 土壤湿度资料(包括土壤体积含水量和土壤湿度)是利用气温、气压、湿度、风速、降水辐射数据和初始场信息驱动 CLM3.5 和 Noah-MP

(1—4)陆面模式集合模拟而得到,这种多陆面模式模拟的结果有效地降低了单模式模拟的不确定性。CLDAS 数据实现了微波亮温数据的直接同化,同时考虑次网格的变异性且更新了地表参数集,使得同化数据精度得到提高。其中,CLDAS-V2.0 土壤体积含水量数据分为 5 层,分别为 0—5, 0—10, 10—40, 40—100, 100—200 cm,土壤体积含水量的单位为 (m^3/m^3)。产品覆盖东亚区域(0°—65°N, 60°—160°E),空间分辨率为 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ 。该数据集可以提供在线(Online)和离线(Offline)两种模拟方式,目前中国气象数据网公开提供 2008 年至今的数据产品,包括时间分辨率为 1 h 的和逐日的 UTC 数据(00—23 时)。由于 CLDAS-V2.0 实时数据从 2017 年来时更新到目前,故本研究采用 2017—2018 年逐日 UTC 数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。GLDAS-2.1 土壤湿度资料是由 NASA 和 NOAA 共同发展的全球陆面同化系统输出,陆面资料包括月均值和 3 h 产品,包括 4 个陆面模式输出资料(Mosaic, Noah, CLM 和 VIC)。其中,由 Noah 模式生成的产品空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,其余模式生成的产品空间分辨率均为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。GLDAS 数据通过改变陆面模式输入数据,提高陆面模式模拟的精度,而未真正引进同化方法^[14]。为此,本研究选取与 CLDAS-V2.0 土壤湿度资料同期的由 Noah 模式生成的全球逐 3 h 资料数据。该数据在剖面上分为 4 层,分别为 0—10, 10—40, 40—100, 100—200 cm,土壤湿度单位为 kg/m^2 ^[15-17]。数据来源于 NASA EarthDATA 网(<http://disc.gsfc.nasa.gov/earthdata-login>)。

(2) 气象观测资料。目前川西高原已有 8 个自动土壤水分观测站(automatic soil moisture observation station, ASM),可实现 24 h 自动连续观测。各站点的垂直观测深度均为 100 cm,分为 8 层,分别为:0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 70—80, 90—100 cm。选择与土壤水分同化产品同期的各站点 2017—2018 年 5—10 月的逐小时数据作为参考数据,对不同土壤水分产品数据进行评估。其中,由于松潘站 2018 年 7—8 月自动土壤水分观测数据缺失,因此评估中未分析该站点这些时段的数据。在对不同深度土壤水分数据的应用分析中,本文还用到 2017—2018 年 5—10 月的逐 6 h 日降水量数据。以上 2 种气象观测数据均由四川省气象局提供。

1.2.2 数据处理 由于土壤水分同化数据和气象站点观测数据均存在时间和空间分辨率不一致的情况,同时,土壤水分数据的单位量纲也不同,因此,需要对基础数据进行时间和空间匹配以及单位换算处理。

(1) 数据时间匹配。分别将 GLDAS 和气象观测站的土壤水分数据采用平均值法合成为日数据,与 CLDAS 土壤水分数据时间尺度一致。

(2) 数据空间匹配。目前土壤水分产品空间匹配的方法多采用最邻近格点匹配法或双线性插值法。依据刘川等^[11]的研究结论,邻近格点匹配法可以在青藏高原地区获得更小的土壤温湿度标准误差。为此,本文采用距离观测站位置最近的格点值与气象站点观测值进行空间匹配的方法,分别获得 2 种土壤水分同化产品在气象站点处的土壤水分数据。当观测数据为缺测时,对应的陆面模式数据也视为缺测,不进行比较和评估。

由于 2 种土壤水分同化产品的土壤剖面分层方法一致,且气象站点的垂直观测深度为 100 cm,为了评估不同深度土壤水分产品数据在川西高原的适用性,本文将气象站点的土壤水分数据采用以下计算方法统一到 0—10,10—40 cm 和 40—100 cm 3 个剖面尺度。其中,10—40 cm 和 40—100 cm 剖面土壤水分的计算方法如下^[18]:

$$SM_{10-40\text{ cm}} = (10 \times SM_{10-20} + 10 \times SM_{20-30} + 10 \times SM_{30-40}) / 30 \quad (1)$$

$$SM_{40-100\text{ cm}} = (10 \times SM_{40-50} + 10 \times SM_{50-60} + 10 \times SM_{70-80} + 10 \times SM_{90-100}) / 40 \quad (2)$$

式中: SM_{10-20} , SM_{20-30} , SM_{30-40} , SM_{40-50} , SM_{50-60} , SM_{70-80} 和 SM_{90-100} 分别为 10 表示 20 cm, 20 表示 30 cm, 30 表示 40 cm, 40 表示 50 cm, 50 表示 60 cm, 70 表示 80 cm 与 90 表示 100 cm 的气象观测土壤水分数据。

(3) 土壤水分数据的单位换算。由于 CLDAS 和气象观测土壤水分数据均为土壤体积含水量,而 GLDAS 土壤水分数据为质量含水量(单位为 kg/m^2),因此,本文参考朱智等人的计算方法将 GLDAS 土壤水分数据转换为体积含水量^[19],其计算公式如下:

$$\text{体积含水量} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times \frac{1\,000\text{ mm}}{1\text{ m}} \times \frac{1}{\text{土壤层厚度}(\text{mm})} \quad (3)$$

据此,可分别计算 GLDAS 数据 0—10,10—40 cm 和 40—100 cm 的土壤体积含水量,其计算方法如下:

$$GSM_{v_{0-10\text{ cm}}} = GSM_{0-10\text{ cm}} \times \frac{1}{100} \quad (4)$$

$$GSM_{v_{10-40\text{ cm}}} = GSM_{10-40\text{ cm}} \times \frac{1}{300} \quad (5)$$

$$GSM_{v_{40-100\text{ cm}}} = GSM_{40-100\text{ cm}} \times \frac{1}{600} \quad (6)$$

式中: GSM_{0-10} , GSM_{10-40} , GSM_{40-100} 分别代表 GLDAS 数据 0—10,10—40 cm 和 40—100 cm 的质量含水量; $GSM_{v_{0-10}}$, $GSM_{v_{10-40}}$, $GSM_{v_{40-100}}$ 分别代表 GLDAS 数据 0—10,10—40 cm 和 40—100 cm 的体积含水量。

1.2.3 误差的度量方法 选择相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和平均偏差(Bias)对土壤水分同化产品进行误差分析,以量化同化数据与观测资料间的一致性水平以及同化产品在川西高原的适用性^[20]。其中,相关系数 R 表示土壤水分同化产品与站点观测数据的线性相关程度,最优值为 1,相关系数越高表明模式数据与观测值的趋势越接近。均方根误差 RMSE 和平均偏差 Bias 反映土壤水分同化产品和地面观测数据的离散程度,可以表示同化产品数据的整体误差和精度,两者绝对值越小越好,最优值为 0。

2 结果与分析

2.1 土壤水分同化产品在川西高原地区的适用性

(1) 同化产品与观测数据的相关性分析。由川西高原地区 8 个气象站点日土壤水分观测值与 2 套土壤水分同化数据的相关性分析结果(表 1)可以看出:①GLDAS-Noah 和 CLDAS 土壤水分产品与站点观测值均具有较好的相关关系,多数站点的产品数据与观测值间呈现极显著的相关性。总体来看,GLDAS-Noah 产品数据与站点观测值有更稳定的一致性关系,尤其是在 0—40 cm 的 2 层土层中,产品结果与观测值的相关性都通过极显著性检验,且相关系数为正值。②从不同深度土壤水分数据的相关系数来看,所有站点表层和浅层 GLDAS-Noah 和 CLDAS 产品数据与观测值的相关性更好,但有些深层数据间的相关性较差。CLDAS 深层土壤水分数据与观测值的相关性表现略优于 GLDAS-Noah 数据,CLDAS 有 3 个站点的深层土壤水分数据与观测值的相关性未通过显著性检验,GLDAS-Noah 数据有 4 个站点未通过显著性检验。

(2) 同化产品的误差分析。从 8 个气象站点土壤水分产品数据与观测值的平均偏差(表 2)可以看出,各站点 GLDAS-Noah 和 CLDAS 产品数据的误差都较小,所有站点不同层次的平均误差为 $0.067\text{ m}^3/\text{m}^3$,两套数据产品与观测值间的误差差异不大。从不同层次的平均偏差来看,两套数据平均偏差值的排序均为:表层 < 浅层 < 深层,说明同化产品对表层土壤水分的模拟结果比深层更好。相比较

而言,CLDAS 数据与观测值的平均偏差在土壤表层比 GLDAS-Noah 更小。对比不同站点的数据误差结果,发现产品数据在各站点的表现存在差异。两套数据在甘孜、石渠和松潘 3 个站点与观测值的平均偏

差都较小,在壤塘和茂县 2 站点的平均偏差相对较大。两套数据在金川、理县和黑水的平均偏差也较大,但 GLDAS-Noah 数据的结果比 CLDAS 数据稍好。

表 1 川西高原不同站点土壤水分观测值与土壤同化产品的相关系数

资料	土壤剖面深度/cm	甘孜	壤塘	黑水	金川	理县	茂县	石渠	松潘
GLDAS	0—10	0.651**	0.405**	0.134**	0.518**	0.161**	0.213**	0.570**	-0.170**
	10—40	0.156**	0.397**	-0.206**	0.475**	0.149**	0.349**	0.604**	-0.249**
	40—100	0.228**	-0.011	-0.040	0.104	0.172**	0.047	0.362**	0.643**
CLDAS	0—10	0.036	0.161**	-0.085	0.257**	-0.265**	0.179**	0.269**	-0.253**
	10—40	0.126**	-0.213**	-0.072	0.021	-0.401**	0.172**	0.483**	0.008
	40—100	0.406**	0.027	0.104	0.305**	-0.491**	0.483**	0.372**	0.054

注:①* * 表示相关性通过 99%的可信度检验。②GLDAS 为全球陆面同化系统;CLDAS 为中国气象局陆面系统。下同。

表 2 川西高原不同站点土壤水分观测值与土壤同化产品的平均偏差

资料	土壤剖面深度/cm	甘孜	壤塘	黑水	金川	理县	茂县	石渠	松潘	各站点平均
GLDAS	0—10	0.057	0.238	0.107	0.124	0.157	0.219	0.048	0.093	0.056
	10—40	0.022	0.202	0.134	0.108	0.179	0.212	0.023	0.042	0.067
	40—100	0.022	0.194	0.256	0.076	0.158	0.203	0.038	0.040	0.079
CLDAS	0—10	0.111	0.183	0.153	0.230	0.276	0.196	0.113	0.117	0.049
	10—40	0.082	0.142	0.163	0.230	0.304	0.201	0.061	0.078	0.067
	40—100	0.062	0.127	0.283	0.231	0.291	0.189	0.051	0.062	0.087

从 8 个气象站点土壤水分产品数据与观测值的均方根误差(表 3)可以看出,各站点 GLDAS-Noah 和 CLDAS 产品数据的误差都较小,所有站点不同层次的平均均方根误差为 $0.152 \text{ m}^3/\text{m}^3$,两套数据产品与观测值间的误差差异不大。从不同层次的平均均方根误差来看,两套数据平均均方根误差值的排序均为浅层<深层<表层,说明同化产品对浅层土壤水分的模拟效果比表层和深层好。

相比而言,GLDAS-Noah 数据与观测值的平均均方根误差比 CLDAS 数据更小。对比不同站点的数据均方跟误差结果,发现产品数据在各站点的表现存在差异。两套数据在甘孜、石渠和松潘 3 个站点与观测值的均方根误差都较小,在壤塘和茂县 2 站点的均方根误差相对较大。两套数据在金川、理县和黑水的均方根误差也较大,但 GLDAS-Noah 数据的结果比 CLDAS 数据稍好。

表 3 川西高原不同站点土壤水分观测值与土壤同化产品的均方根误差

资料	土壤剖面深度/cm	甘孜	壤塘	黑水	金川	理县	茂县	石渠	松潘	各站点平均
GLDAS	0—10	0.068	0.241	0.129	0.135	0.166	0.222	0.067	0.095	0.140
	10—40	0.028	0.207	0.157	0.119	0.187	0.217	0.030	0.057	0.125
	40—100	0.029	0.196	0.266	0.086	0.160	0.204	0.045	0.046	0.129
CLDAS	0—10	0.129	0.190	0.171	0.239	0.283	0.201	0.129	0.134	0.185
	10—40	0.091	0.149	0.177	0.204	0.315	0.207	0.068	0.099	0.164
	40—100	0.071	0.132	0.287	0.233	0.293	0.191	0.056	0.080	0.168

总的来说,两套资料在甘孜、石渠和松潘误差较小,甘孜、石渠、金川、壤塘和松潘相关系数较高。综上所述,两套陆面模式有各自的优势,GLDAS 数据在数值上更接近于观测值,CLDAS 土壤水分产品具有较高的空间分辨率,能够刻画土壤水分的细微变化且

在深层更具优势,因此,GLDAS-Noah 和 GLDAS 陆面模式资料均可作为川西地区自动观测的替代资料。

2.2 降水对土壤水分同化精度的影响

为了分析降水对土壤水分同化产品精度的影响,选择当日是否有有效降水选择标准为当日降水量 >

0,则为有效降水,分别计算两套土壤水分同化产品和观测值之间的平均偏差,从 8 个站点的平均值(表 4)可以看出:降水对土壤水分同化产品的误差存在明显的影响,GLDAS-Noah 和 CLDAS 土壤水分同化产品与站点数据的平均偏差均在有降水的情况下比无降水时小,说明两套数据在无降水的时候对土壤水分的高估甚于有降水的情况。同时,降水对土壤水分同化精度的影响也存在数据和区域的差异,GLDAS-Noah 数据相比于 CLDAS 数据的误差更小,10—40 cm 的误差小于 0—10 cm 的误差。但是,在有降水情况下上下两层数据的平均偏差比较接近,无降水情况下表层土壤水分的误差比浅层土壤水分的误差更大。

表 4 有无降水对土壤同化产品数据平均误差影响的对比

土壤剖面 深度/cm	GLDAS		CLDAS	
	有降水	无降水	有降水	无降水
0—10	0.119	0.139	0.157	0.189
10—40	0.116	0.119	0.154	0.169

从各站点在有无降水情况下土壤水分同化产品与观测值的平均偏差对比结果(图 1)还可以看出,两套数据在研究区中部地区的误差相对较大。

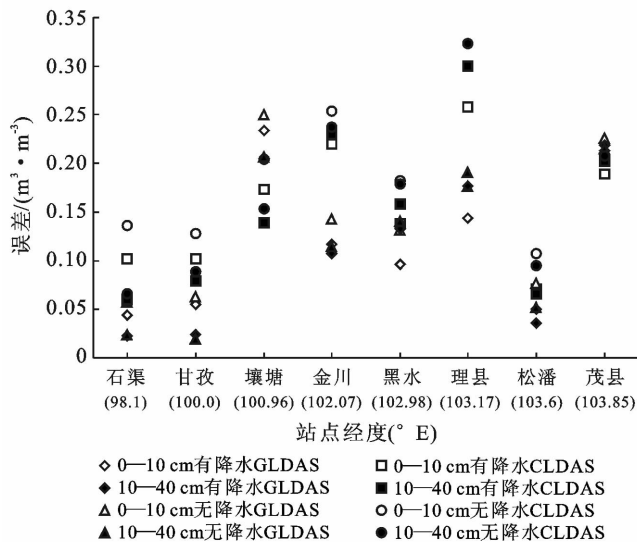


图 1 川西高原各站点有无降水土壤水分同化产品与观测值的平均偏差

2.3 土壤水分变化对降水过程的响应分析

降水是影响土壤水分变化的主要因素,为了分析产品数据对降水过程的响应,选择 2017—2018 年 5—10 月间典型的降水事件作为分析对象。这里的典型降水事件指的是,从降水开始到降水结束,降水前后 3 d 内无有效降水。根据气象站点的日降水量数据,符合条件如下表 5 所示,总计有 5 次。

表 5 2017—2018 年 5—10 月典型降水事件

月份	6	7	8	9	10
累计降水量/mm	29.2	32.2	15.9	15.3	17.0

根据典型事件过程的累计降水量分析,仅分析表层和浅层土壤水分与降水变化关系,图 2 是不同典型降水事件过程中,不同土壤水分数据随时间的变化过程。从图 2 上可以看出:①土壤水分同化产品数据与观测数据(ASM)在 0—40 cm 土层内都能表现出对降水过程的响应,表现为土壤水分数据随降水过程的开始而增大,且随降水结束而逐渐减小。并且,随着土层深度的增大,土壤水分数据的变化幅度减小,两套土壤水分同化产品均和观测值随时间的变化具有相同趋势。②0—40 cm 深度内,相比于土壤水分同化数据,气象观测数据 ASM 对降水变化的响应过程更加灵敏。对比两种产品数据的表现,GLDAS 数据比 CLDAS 数据相对灵敏,少量降水就能够引起表层土壤水分变化,随着降水量增大,有时会突然出现低估现象,而 CLDAS 资料则更加平稳。从数据结果来看,2 种产品数据均大于观测值,说明产品数据都存在对土壤水分的高估,GLDAS-Noah 数据更接近观测值。

2.4 土壤水分同化产品的空间分布

利用 ArcGIS 制图进一步对 2 种土壤水分同化数据在空间分布表达上的差异进行对比分析。利用 2017—2018 年 5—10 月平均土壤水分不同深度数据求平均值后制作研究区不同深度土壤水分空间分布图(图 3),可以看出:两套数据都能表现出川西地区土壤水分空间分异的特征,总体上表现为北部高于南部、东南高于西北的空间分布特征,并且,土壤水分随着土壤层深度的增加而增大。从数值上看,两套土壤水分产品 0—10 cm 和 10—40 cm 深度的最高值差别不大,40—100 cm 土壤水分最大值较前 2 层土壤水分差别较大。另外,从图上也可以看出,GLDAS-Noah 产品的空间异质性相比于 CLDAS 产品较差。

3 讨论

(1) 本文采用气象站点的数据评估 2 种栅格尺度的土壤水分同化数据,得出 GLDAS-Noah 土壤水分产品在数值上比 CLDAS 产品更接近于观测值,该结论与刘欢欢等^[21]在黄土高原研究的结论相似。非冻结期 GLDAS 资料土壤水分资料在 0—10 cm, 10—40 cm 适用性更好,但是在深层其适用性较差,这与 Chen et al.^[8]以及邓明珊等^[22]的结论一致。

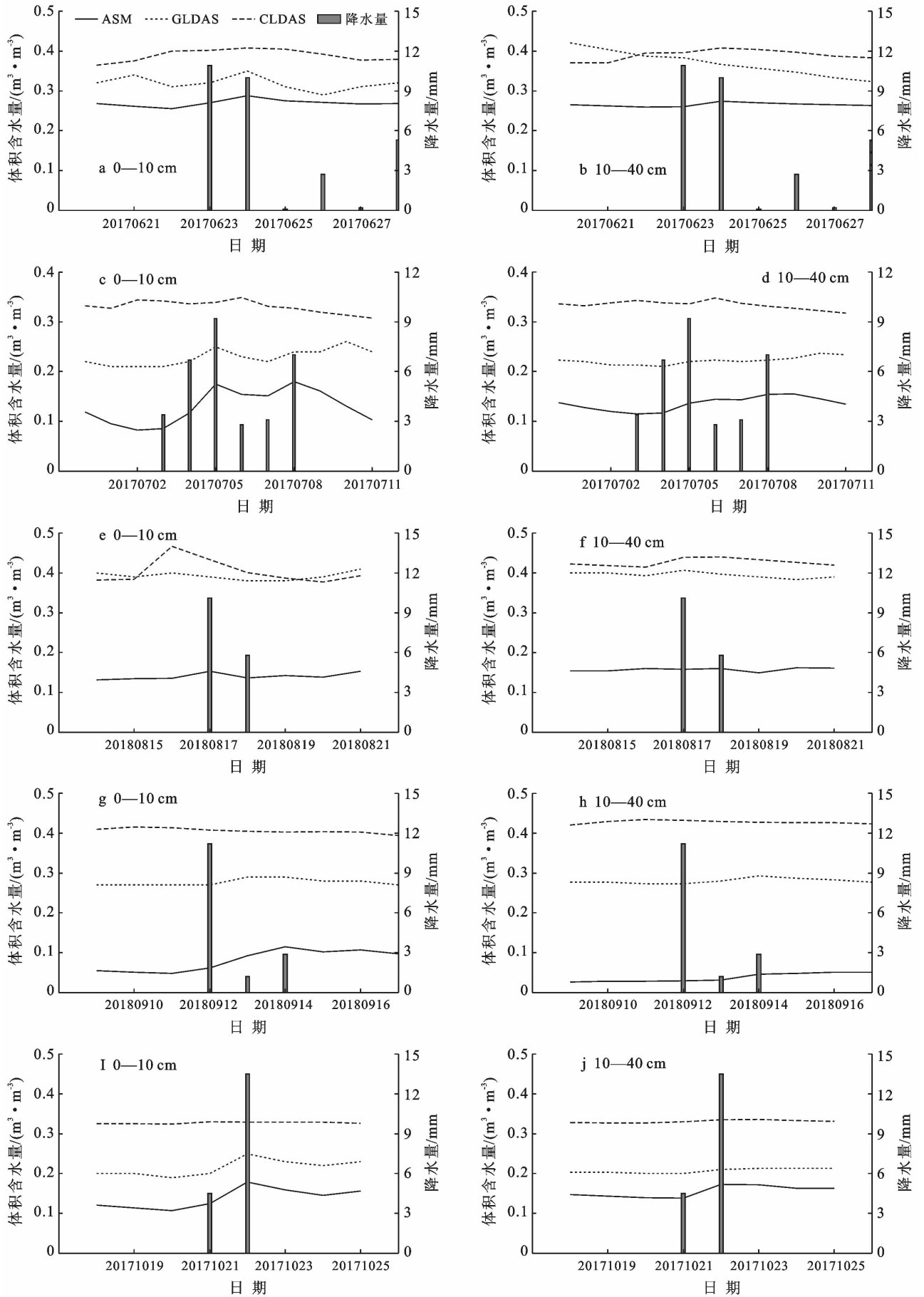


图 2 川西高原土壤水分和降水随时间变化特征

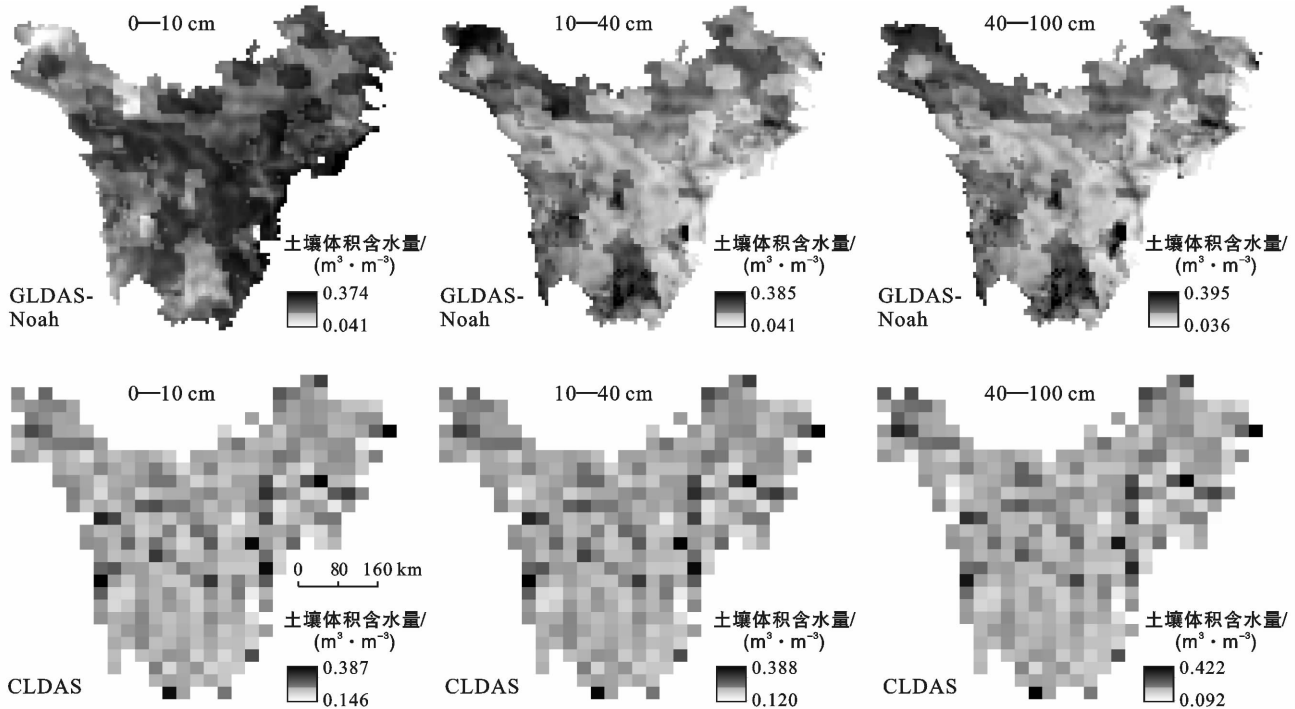


图 3 川西高原非冻结期 GLDAS-Noah 和 CLDAS 土壤水分数据空间分布对比 (m^3/m^3)

(2) 由于评估数据与观测数据空间尺度不同,本文采用邻近格点匹配的格点数据并不能完全代表真实的观测值,这会一定程度上对评估结果的准确性造成影响。两套土壤水分同化产品在不同站点的误差存在较大的差异,这与模式驱动、参数化方案和下垫面性质有关,这与 Zeng 等^[23]结论一致。由于高原地区具有复杂的气候、地形、植被与土壤条件,这使得土壤水文具有很强的空间变异性。但是,由于目前对空间异质性较强区域的土壤水分变化的机理尚不够清晰,且在剖面尺度上土壤水分运动的规律更加复杂。CLDAS 系统采用单柱模型,对于面流、径流等水文过程对土壤湿度的影响考虑较少,GLDAS 由于下垫面数据在中国区域不够精细和模式水文模块有待进一步完善。为此,现有的土壤水分产品数据的精度还不足以满足高原地区不同剖面土壤水分数据的需求。土壤水分空间异质性的规律,土壤水分动态变化过程的机理以及土壤水分模拟的物理模型等都有待进一步研究和发展。

4 结论

本研究通过将 CLDAS 和 GLDAS 土壤水分同化产品与观测资料的对比,评估 GLDAS-Noah 数据和 CLDAS 数据在川西地区的适用性,得到以下主要结论。

(1) 两套土壤水分同化产品均能较好的模拟研究区土壤水分情况,在日尺度上两套资料在川西地区

适用性都好,但都存在明显的高估现象。GLDAS-Noah 土壤水分产品在数值上更接近于观测值,但 CLDAS 产品因具有较高的空间分辨率更能反映土壤水分空间分布的异质性特征。同时,CLDAS 深层土壤水分数据的精度优于 GLDAS 数据。

(2) 无降水情况下两套土壤水分产品对土壤水分的高估甚于有降水的情况,但是在有降水的情况下表层和浅层数据的误差比较接近,在无降水情况下表层土壤水分的误差比浅层土壤水分的误差更大。两套土壤水分产品都能表现出与降水一致的变化过程,且土壤水分数据的变化均滞后于降水量的变化,GLDAS-Noah 数据比 CLDAS 数据对降水的反应更加灵敏。

【 参 考 文 献 】

- [1] 林洁,陈效民,张勇. 气候变化与土壤湿度关系的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1271-1276.
- [2] Peng Jian, Loew A, Merlin O, et al. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(2): 341-366.
- [3] 师春香,谢正辉,钱辉,等. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化[J]. 中国科学(地球科学), 2011, 41(3): 375-385.
- [4] Mc Laughlin D. Recent developments in hydrologic data assimilation [J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(S2): 977-984.
- [5] 张秀英,江洪,韩英. 陆面数据同化系统及其在全球变化研究中的应用[J]. 遥感信息, 2010(4): 135-143.

- [6] 李新,黄春林,车涛,等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻[J]. 自然科学进展,2007,17(2):163-173.
- [7] Shi Chunxiang, Xie Zhenghui, Qian Hui, et al. China land soil moisture En KF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. Science China(Earth Sciences),2011,54(9):1430-1440.
- [8] Chen Yingying, Yang Kun, Qin Jun, et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013,118(10):4466-4475.
- [9] 宋海清,李云鹏,张静茹,等. 内蒙古地区多种土壤湿度资料的初步评估[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8):139-144.
- [10] 秦道清,赵岩,王红瑞,等. 基于站点观测和模式模拟的北京市土壤湿度[J]. 自然资源学报,2019,34(1):191-204.
- [11] 胡伟,马伟强,马耀明,等. GLDAS 资料驱动的 Noah-MP 陆面模式青藏高原地表能量交换模拟性能评估[J]. 高原气象,2020,39(3):486-498.
- [12] 陈燕丽,黄思琦,莫建飞,等. 基于 CLDAS 数据的甘蔗干旱监测评估标准对比:以 2011 年广西干旱为例[J]. 干旱气象,2020,38(2):188-194.
- [13] 李登宣,王澄海. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系[J]. 冰川冻土,2016,38(1):89-99.
- [14] 刘川,余晔,解晋,等. 多套土壤温湿度资料在青藏高原的适用性[J]. 高原气象,2015,34(3):653-665.
- [15] Berg A A, Famiglietti J S, Walker J P, et al. Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003,108(D16):4490.
- [16] Rodell M, Houser P R, Jambor U E A, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004,85(3):381-394.
- [17] 王玉娟,王树东,宋文龙,等. GLDAS 数据产品在渭河流域潜在蒸散发模拟中的应用研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(12):53-58.
- [18] González-Zamora A, Sánchez N, Martínez-Fernández J, et al. Root-zone plant available water estimation using the SMOS-derived soil water index [J]. Advances in Water Resources, 2016,96:339-353.
- [19] 朱智,师春香. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估[J]. 科学技术与工程,2014,14(32):138-144.
- [20] Entekhabi D, Reichle R H, Koster R D, et al. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010,11(3):832-840.
- [21] 刘欢欢,王飞,张廷龙. CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度资料在黄土高原的适用性评估[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(5):270-276,294.
- [22] 邓明珊,孟宪红,马英赛,等. 基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J]. 干旱气象,2018,36(4):595-602.
- [23] Zeng Jiangyuan, Li Zhen, Chen Quan, et al. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2015,163:91-110.

(上接第 172 页)

- [20] Liu Zhen, Yu X B, Wan Lin. Influence of contact angle on soil-water characteristic curve with modified capillary rise method [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013,2349(1):32-40.
- [21] Liu Zhen, Yu Xiong, Wan Lin. Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils [J]. Acta Geotechnica, 2016,11(1):21-35.
- [22] 杨松,龚爱民,吴珺华,等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. 岩土力学,2015,36(3):674-678.
- [23] Ramírez-Flores J C, Bachmann J, Marmur A. Direct determination of contact angles of model soils in comparison with wettability characterization by capillary rise [J]. Journal of Hydrology, 2010,382(1/2/3/4):10-19.
- [24] 杨松,马泽慧,王磊,等. 躺滴法测量干湿循环条件下土壤固-液接触角的滞后特性[J]. 农业工程学报,2018,34(2):114-119.
- [25] Alghunaim A, Kirdponpattara S, Newby B M Z. Techniques for determining contact angle and wettability of powders [J]. Powder Technology, 2016,287:201-215.
- [26] Pittoni P G, Lin C H, Yu T S, et al. On the uniqueness of the receding contact angle: Effects of substrate roughness and humidity on evaporation of water drops [J]. Langmuir, 2014,30(31):9346-9354.
- [27] Erbil H Y, McHale G, Rowan S M, et al. Determination of the receding contact angle of sessile drops on polymer surfaces by evaporation [J]. Langmuir, 1999,15(21):7378-7385.
- [28] Chaney R C, Demars K R, Vanapalli S K, et al. The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till[J]. Geotechnical Testing Journal,1996,19(3):259-268.