(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2023 年 5 月 25 日 (25.05.2023)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2023/088366 A1

(51) 国际专利分类号:
G01N 27/04 (2006.01) *G06V 10/75* (2022.01)
G01S 19/14 (2010.01) *G06V 10/764* (2022.01)
G06V 20/13 (2022.01) *G06V 10/774* (2022.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2022/132570

(22) 国际申请日: 2022 年 11 月 17 日 (17.11.2022)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202111370955.2 2021年11月18日 (18.11.2021) CN

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 史舟 (SHI, Zhou); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 王楠 (WANG, Nan); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 彭杰 (PENG, Jie); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 薛杰 (XUE, Jie); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区古墩路701号紫金广场C座1506室/傅朝栋, Zhejiang 310058 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(54) **Title:** METHOD FOR JOINTLY ESTIMATING SOIL PROFILE SALINITY BY USING TIME-SERIES REMOTE SENSING IMAGE

(54) **发明名称:** 一种利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法

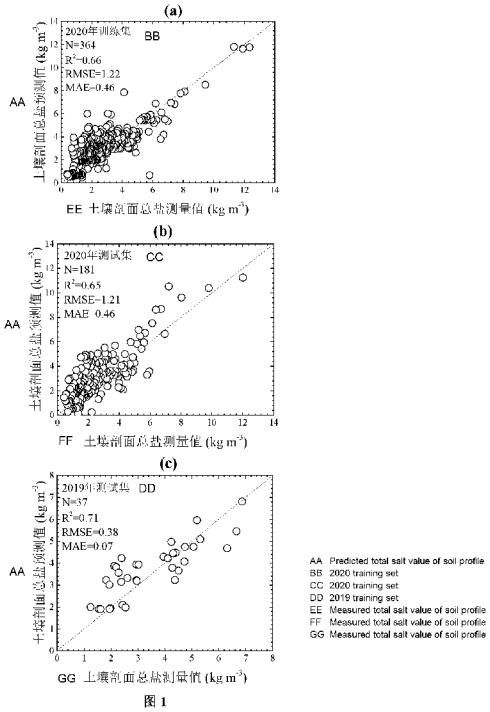


图 1

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a method for jointly estimating soil profile salinity by using a time-series remote sensing image. The method comprises: first, obtaining EM38-MK2 soil conductivity data and monthly average Sentinel-2 satellite remote sensing image data of a long time series for describing a soil profile sample (1 m) of the same object; secondly, obtaining the salt content of the soil profile with the depth of 1 m according to a linear regression equation and a profile salt content calculation formula; thirdly, obtaining an index of a time series-based monthly average Sentinel-2 image as an independent variable of modeling by using a mode of screening the independent variable with a random forest; and finally, taking the salt content of the soil profile with a sample point of 1 meter as a dependent variable, and estimating by using a space-time convolutional network regression model to obtain a large-space-scale soil profile salt content distribution map. According to the present invention, the total salt content level of the profile soil is quantitatively analyzed, the technical bottleneck that the remote sensing means can only observe soil information of the earth surface is broken through, and a new thought is provided for characterization of large-space-scale profile soil salt information.

WO 2023/088366 A1

[见续页]

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：本发明公开了一种利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法。该方法首先获取用于描述同一对象的土壤剖面样品(1米)、EM38-MK2土壤电导率数据及长时间序列的月平均Sentinel-2卫星遥感影像数据；其次，根据线性回归方程式以及剖面盐分含量计算式得到1米深土壤剖面盐分含量；再次，利用随机森林筛选自变量的方式，得到基于时间序列月平均Sentinel-2影像的指数作为建模的自变量；最后，以样点1米深土壤剖面盐分含量为因变量，利用时空卷积网络回归模型估算，得到大空间尺度的土壤剖面盐分含量分布图。本发明定量分析了剖面土壤总盐分含量水平，突破了遥感手段只能观测地表的土壤信息这一技术瓶颈，为大区域尺度内剖面土壤盐分信息的表征提供了新思路。

一种利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法

技术领域

本发明涉及遥感反演领域，具体涉及到基于时间序列 Sentinel-2 数据高精度反演土壤剖面（1 米）盐分含量的算法。

背景技术

土壤盐渍化是全球面临的土地退化问题之一，原生盐渍化和次生盐渍化严重危害了土壤健康和作物生产。特别是在干旱和半干旱地区，土壤蒸散量高于降水量，导致土壤中的盐分随着水分的蒸发而向上运移，在土壤表面结成盐壳。土壤盐渍化的监测和可视化对于土壤资源、尤其是耕地的保护和利用具有重要意义。地面调查和近地土壤传感调查是盐分信息最直接的获取手段和来源，能精确表示采样点土壤盐分的含量和分布，但无法准确描述大面积土壤盐分的分布情况及同时期快速调查。相较于传统野外调查方法，卫星遥感具有空间范围覆盖广，观测空间分辨率高、时间重返周期性短的特点，可以快速提供有关土壤的大量信息，逐渐成为土壤盐分监测的重要方法。

光学遥感卫星对土壤盐分表征的深度有限，以往的研究集中在对表土（0-0.2 米）的土壤盐分监测，而在对根区或底土的土壤盐分的估算中表现不佳。盐分在土体中随着水分的运移而在垂直方向上运移，降水、蒸散、土地管理措施（洗盐、作物播种、灌溉、收获）等周期性发生，导致土壤剖面中盐分的周期性运移。因此，表土中的盐分含量无法全面反映土壤健康状况。利用单个时期遥感影像获取土壤信息的方法时效性强，但仅限于单个时期的表土反盐量监测，无法实现对土壤剖面盐分含量的全面评估。面向单个时期遥感影像在土壤剖面盐分估算上的局限性，需要针对多个时期遥感影像进行时间序列分析，进行地面观测深度的拓展，从而实现对 1 米深的土壤剖面盐分含量的全面估算。

发明内容

本发明的目的在于解决现有技术中存在的问题，并提供一种利用时间序列遥

感影像联合估算土壤剖面盐分的方法。

本发明的具体技术方案如下：

一种利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其步骤如下：

S1：获取待测区域在待估算时期下对应的单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和地面调查数据；同时获取待测区域在待估算时期之前的 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列；

其中，所述地面调查数据包含在待估算时期采集的多深度实测电导率数据和 EM38-MK2 电导率数据；所述多深度实测电导率数据中包含了第一土壤采样点集合中每个土壤采样点的分段电导率数据，所述分段电导率数据包含土壤采样点所在位置深度为 1 米的土壤剖面按照设定间隔分段采样后实测得到的不同土层深度各自的电导率，其中土壤表面所在的一段土层为土壤表层；所述 EM38-MK2 电导率数据包含第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的多模式电导率数据，所述多模式电导率数据包含土壤采样点所在位置在不同深度分别按照不同模式测得的多个电导率；且第一土壤采样点集合为第二土壤采样点集合的子集；

S2：将 S1 中获取的三类数据按照 S21~S23 进行多源数据匹配处理：

S21：针对第一土壤采样点集合中的每个土壤采样点对应的分段电导率数据和多模式电导率数据进行线性回归，使线性回归模型能够基于所述多模式电导率数据估计同一土壤采样点的所述分段电导率数据；

S22：针对第二土壤采样点集合中的每个土壤采样点，利用所述线性回归模型估计每个土壤采样点对应的 5 个土层深度各自的电导率，并根据电导率换算得到土壤剖面不同土层深度处的盐分含量，对不同土层深度整合后得到 1 米深土壤剖面总盐分含量；

S23：对 S1 获得的 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列的时间分辨率进行规范化处理，得到空间分辨率和时间分辨率均统一的月平均 Sentinel-2 影像数据集；

S3：基于所述单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和 S22 中得到的第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的土壤表层盐分含量数据，以单一波段以及波段组合计算的方法构建待筛选特征集合作为解释变量，以土壤表层盐分含量作为被解释变量，构建自变量筛选模型对待筛选特征集合中的特征进行筛选，得到用于观测土壤表层盐分含量的最佳特征组合；再对所述月平均 Sentinel-2 影像数据集中的

每一景卫星遥感影像逐像元计算所述最佳特征组合中的每个特征值，得到基于遥感影像的长时间序列指数数据集；

S4：以所述第二土壤采样点集合中各土壤采样点在所述长时间序列指数数据集中对应的最佳特征组合特征值作为自变量，以 S22 中得到的所有第二土壤采样点集合中各土壤采样点的 1 米深土壤剖面总盐分含量作为因变量，建立时空回归模型；最后基于所述长时间序列指数数据集，利用时空回归模型来预测待测区域内每一个像元所在位置的 1 米深土壤剖面盐分含量，形成待估算时期对应的 1 米深土壤剖面盐分含量的空间分布图。

作为优选，所述多深度实测电导率数据中，每个土壤采样点处深度为 1 米的土壤剖面按照 0.2m 的间隔分别在 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 进行分段采样，并测定每一段土壤的电导率，得到 5 个土层深度各自的电导率构成所述多深度实测电导率数据。

作为优选，所述 EM38-MK2 电导率数据中，每个土壤采样点处利用 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米和 1.5 米深度分别按照水平和垂直模式测得 4 个电导率，构成所述多模式电导率数据。

作为优选，所述 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列为在待估算时期之前三年至待估算时期之前一年期间获得的待测区域 Sentinel-2 卫星遥感影像，时间跨度为 24 个月，影像空间分辨率为 10 米。

作为优选，所述线性回归模型的形式为：

$$EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}=A+B\times EC_{ah0.75}+C\times EC_{ah1.5}+D\times EC_{av0.75}+E\times EC_{av1.5}$$

其中，$EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}$代表 a-b m 土层深度对应的电导率，$EC_{ah0.75}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米深处按水平模式测得的电导率，$EC_{ah1.5}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 1.5 米深处按水平模式测得的电导率，$EC_{av0.75}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米深处按垂直模式测得的电导率，$EC_{av1.5}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 1.75 米按深处垂直模式测得的电导率，A、B、C、D、E 分别表示五个回归系数。

作为优选，所述 S22 中，根据电导率换算土壤剖面不同土层深度处的盐分含量时，先根据电导率换算可溶性盐含量，再根据可溶性盐含量计算土壤中的盐分含量。

作为优选，所述 S22 中，对不同土层深度整合得到 1 米深土壤剖面总盐分含量所用的整合方法为累加法，累加公式为：

$$Y_{0\text{-}1m}=Y_{0\text{-}0.2m}+Y_{0.2\text{-}0.4m}+Y_{0.4\text{-}0.6m}+Y_{0.6\text{-}0.8m}+Y_{0.8\text{-}1m}$$

其中，$Y_{0\text{-}1m}$代表 1 米深土壤剖面总盐分含量，$Y_{0\text{-}0.2m}$，$Y_{0.2\text{-}0.4m}$，$Y_{0.4\text{-}0.6m}$，$Y_{0.6\text{-}0.8m}$，$Y_{0.8\text{-}1m}$分别是 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 五个土层深度处的盐分含量。

作为优选，所述月平均 Sentinel-2 影像数据集中的每一景卫星遥感影像由同一个月中所有 Sentinel-2 卫星遥感影像平均得到。

作为优选，所述 S3 中，所述的自变量筛选模型为随机森林（Random Forest）模型，所述待筛选特征集合中包含光谱特征、植被指数特征、盐分指数特征和土壤相关指数特征；随机森林模型按均方误差的显着性(%IncMSE) 和节点的纯度(IncNodePurity)筛选待筛选特征集合中的特征，得到与表土中土壤盐分含量相关性最高的若干特征形成最佳特征组合。

作为优选，所述 S4 中的时空回归模型为基于时空卷积网络（Temporal Convolution Network）构建的回归模型。

本发明相对于现有技术而言，具有以下有益效果：

本发明提出了一种基于时间序列 Sentinel-2 卫星遥感数据集和地面实测值反演 1 米深土壤剖面的盐分含量的方法，最终得到空间分辨率为 10 米的高空间分辨率、高质量的土壤剖面盐分含量空间变异结果。通过本发明的方法对土壤剖面盐分含量进行估算，突破了基于遥感数据在观测土壤剖面盐分的瓶颈，为大区域尺度、土壤剖面盐分含量的估算提供了新方法，有利于大区域尺度及剖面、底层土壤盐分的治理改良政策的制定，具有一定的理论、实践意义和推广应用价值。

附图说明

图 1 为土壤剖面盐分含量估算值在 2020 年数据建模集（a）、土壤剖面盐分含量估算值在 2020 年测试集（b）和土壤剖面盐分含量估算值在 2019 年测试集（b）的散点图，代表本发明估算得到的盐分数据相对于地面实测值的验证结果；

图 2 为实施例中 2019 年（a）及 2020 年（b）南疆地区农田 1 米土壤剖面的盐分含量分布图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步阐述和说明。本发明中各个实施方式的技术特征在没有相互冲突的前提下，均可进行相应组合。

在本发明的一个较佳实施例中提供了一种利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，该方法具体步骤如下：

S1：获取待测区域在待估算时期下对应的单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和地面调查数据；同时获取待测区域在待估算时期之前的 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列。

其中，单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和地面调查数据这两类数据均需要是在待估算时期同步采集的。例如，待估算时期是某一个月，那么单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和地面调查数据均需要是这一个月采集的数据。地面调查数据包含在待估算时期采集的多深度实测电导率数据和 EM38-MK2 电导率数据，这两类电导率数据也均需要是待估算时期中同步采集的。

上述多深度实测电导率数据中包含了第一土壤采样点集合中每个土壤采样点的分段电导率数据，而每一个土壤采样点的分段电导率数据包含了该土壤采样点所在位置深度为 1 米的土壤剖面按照设定间隔分段采样后实测得到的不同土层深度各自的电导率，其中在所有的土层深度中土壤表面所在的一段土层为土壤表层。

在本实施例的多深度实测电导率数据中，每个土壤采样点处深度为 1 米的土壤剖面按照 0.2m 的间隔分别在 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 进行分段采样，并用电导率仪测定每一段土壤的电导率，得到 5 个土层深度各自的电导率，依次记为 $EC_{1:5\ (0\text{-}0.2m)}$、$EC_{1:5(0.2\text{-}0.4m)}$、$EC_{1:5(0.4\text{-}0.6m)}$、$EC_{1:5(0.6\text{-}0.8m)}$、$EC_{1:5(0.8\text{-}1m)}$。一个土壤采样点的这 5 个电导率构成了这个土壤采样点的分段电导率数据。

上述 EM38-MK2 电导率数据包含第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的多模式电导率数据，其中每一个土壤采样点的多模式电导率数据包含该土壤采样点所在位置在不同深度分别按照不同模式测得的多个电导率。

在本实施例中的 EM38-MK2 电导率数据中，每个土壤采样点处利用 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米和 1.5 米深度分别按照水平和垂直模式测得 4 个电导率，分别为在 0.75 米深处按水平模式测得的电导率 $EC_{ah0.75}$、在 1.5 米深

处按水平模式测得的电导率 $EC_{ah1.5}$、在 0.75 米深处按垂直模式测得的电导率 $EC_{av0.75}$、在 1.75 米按深处垂直模式测得的电导率 $EC_{av1.5}$。一个土壤采样点的这 4 个不同深度和不同模式下得到的电导率构成了这个土壤采样点的多模式电导率数据。

需要说明的是，上述分段电导率数据是需要采集不同深度土层的土壤进行实测的，而上述多模式电导率数据则仅需要用 EM38-MK2 大地电导率仪在两个不同深度处进行测量即可，因此多模式电导率数据的获取容易程度以及获取效率要大大高于分段电导率数据。由此，本发明中可以在待测区域内通过地面调查采集少量土壤采样点的分段电导率数据，另外采集大量土壤采样点的多模式电导率数据，后续通过在分段电导率数据和多模式电导率数据之间建立回归模型来实现两种数据的转换，从而高效地获取大量土壤采样点的分段电导率数据，用于估算待测区域内不同土壤采样点的土壤剖面盐分。

但需要注意的是，为了保证在分段电导率数据和多模式电导率数据之间可以建立回归模型，用于建模的分段电导率数据和多模式电导率数据需要是针对相同的一批土壤采样点采集的。因此，第一土壤采样点集合应当为第二土壤采样点集合的子集，即第一土壤采样点集合中的土壤采样点都包含在第二土壤采样点集合中，但第二土壤采样点集合中的土壤采样点数量要大于第一土壤采样点集合中的土壤采样点数量，以便于有充足样本数量进行后续建模。

在本实施例中的 Sentinel-2 卫星遥感影像，其影像空间分辨率均为 10 米，但是时间分辨率由于数据质量等客观原因存在差异，后续需要进行统一。

总体而言，上述三类数据属于来源不同的多源数据，其中，多深度实测电导率数据的特点是小空间范围、小样本量；EM38-MK2 电导率数据的特点是小空间范围、大样本量 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列的特点是大空间范围、长时间序列。

S2：将 S1 中获取的三类数据即单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据、地面调查数据、Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列，按照 S21~S23 进行多源数据匹配处理，具体过程下：

S21：针对第一土壤采样点集合中的每个土壤采样点对应的分段电导率数据和多模式电导率数据进行线性回归，从而得到一个线性回归模型，该线性回归模

型能够基于每个土壤采样点的多模式电导率数据估计对应土壤采样点的分段电导率数据。

在本实施例中，线性回归模型的形式为：

$$EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}=A+B\times EC_{ah0.75}+C\times EC_{ah1.5}+D\times EC_{av0.75}+E\times EC_{av1.5}$$

其中，$EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}$代表 a-b m 土层深度对应的电导率，$EC_{ah0.75}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米深处按水平模式测得的电导率，$EC_{ah1.5}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 1.5 米深处按水平模式测得的电导率，$EC_{av0.75}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米深处按垂直模式测得的电导率，$EC_{av1.5}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 1.75 米按深处垂直模式测得的电导率，A、B、C、D、E 分别表示五个回归系数。

对于不同图层深度对应的电导率 $EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}$，其线性回归模型的形式都是相同的，但是其回归系数是不同的，具体的回归系数需根据样本数据拟合后确定。例如，在后续的实例中，5 层不同土层深度处的线性回归模型分别为：

$$EC_{1:5\ (0\text{-}0.2m)}=0.102+0.013\times EC_{ah0.75}+0.018\times EC_{ah1.5}-0.002\times EC_{av0.75}+0.013\times EC_{av1.5}$$

$$EC_{1:5(0.2\text{-}0.4m)}=-0.154-0.001\times EC_{ah0.75}+0.023\times EC_{ah1.5}+0.005\times EC_{av0.75}-0.014\times EC_{av1.5}$$

$$EC_{1:5(0.4\text{-}0.6m)}=-0.247-0.012\times EC_{ah0.75}+0.027\times EC_{ah1.5}+0.001\times EC_{av0.75}-0.001\times EC_{av1.5}$$

$$EC_{1:5(0.6\text{-}0.8m)}=-0.118-0.012\times EC_{ah0.75}+0.015\times EC_{ah1.5}+0.007\times EC_{av0.75}-0.005\times EC_{av1.5}$$

$$EC_{1:5(0.8\text{-}1m)}=0.028-0.009\times EC_{ah0.75}+0.013\times EC_{ah1.5}+0.003\times EC_{av0.75}-0.004\times EC_{av1.5}$$

S22、针对第二土壤采样点集合中的每个土壤采样点，可将每个土壤采样点的多模式电导率数据输入前述线性回归模型中，利用前述线性回归模型估计每个土壤采样点的分段电导率数据，即每个土壤采样点对应的 5 个土层深度各自的电导率。而土壤的电导率与土壤中的盐分含量存在直接的相关性，可基于两者之间的相关关系，根据不同土层深度的电导率换算得到土壤剖面不同土层深度处的盐分含量，进而对 1 米深土壤剖面内不同土层深度整合后得到 1 米深土壤剖面总盐分含量。

需注意的是，土壤的电导率与土壤中的盐分含量之间的相关性转换公式可以根据实际数据进行测定得到，亦可根据现有技术中给出的转换公式进行确定。一般而言，根据电导率换算土壤剖面不同土层深度处的盐分含量时，可以先根据电导率换算可溶性盐含量，再根据可溶性盐含量计算土壤中的盐分含量。

在本实施例中，可溶性盐含量 c 的计算公式为 c（g/kg）=0.0275*EC-0.0573，其中 EC 是指土壤的电导率，单位为 mS/m。任一土层深度处的盐分含量的计算公式为：

$Y= \rho \times c/1000$

其中，Y 代表计算得到的剖面盐分含量，单位为 kg/m^3；ρ 代表土壤容重，单位为 kg/m^3，c 代表可溶性盐含量，单位为 g/kg。由于本实施例中的土层间隔为 0.2m，因此上述公式计算后得到的是土壤剖面每 0.2m 深度的可溶性盐含量。

另外，对不同土层深度整合得到 1 米深土壤剖面总盐分含量所用的整合方法为累加法，累加公式为：

$Y_{0\text{-}1m}=Y_{0\text{-}0.2m}+ Y_{0.2\text{-}0.4m} + Y_{0.4\text{-}0.6m} + Y_{0.6\text{-}0.8m} + Y_{0.8\text{-}1m}$

其中，$Y_{0\text{-}1m}$ 代表 1 米深土壤剖面总盐分含量，$Y_{0\text{-}0.2m}$，$Y_{0.2\text{-}0.4m}$，$Y_{0.4\text{-}0.6m}$，$Y_{0.6\text{-}0.8m}$，$Y_{0.8\text{-}1m}$ 分别是 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 五个土层深度处的盐分含量。

按照 S22 对第二土壤采样点集合中的每个土壤采样点进行处理和计算，即可得到大样本量的土壤剖面 1 米深的可溶性盐含量数据。

另外，需要注意的是，此步骤中第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的土壤表层盐分含量数据（即 $Y_{0\text{-}0.2m}$）也需要单独保存，这部分数据后续将用于与遥感影像数据一起进行最佳解释特征的筛选。

S23：对 S1 获得的 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列的时间分辨率进行规范化处理，得到空间分辨率和时间分辨率均统一的月平均 Sentinel-2 影像数据集。在本实施例中，空间分辨率都是 10 米，时间分辨率都是一个月。因此在进行规范化处理时，主要需要对一个月中存在多景卫星遥感影像的数据进行处理，将同一个月中所有 Sentinel-2 卫星遥感影像进行平均，平均后的影像作为这一个月的卫星遥感影像归入平均 Sentinel-2 影像数据集中。在具体实现时，遥感影像的月平均值可采用栅格逐像元计算方法，对单幅影像以月份为目标时间单位进行分类，对分类至同一个月份中所有单幅 Sentinel-2 卫星遥感影像中的全波段进行计算，逐个像元地将相同位置的栅格值相加并求平均值，即可得到长时间序列、空间分辨率为 10m、时间分辨率为 1 个月的 Sentinel-2 月平均数据集。经过时间分辨率的规范化，可以保证相同长度的时间序列中所包含的影像数量相同，避免后续建

模时出现输入数据的不统一。

S3：以 S21 中得到的土壤表层盐分含量（0-0.2 米）的计算结果和 S23 中得到的与地面调查同一时期的单景 Sentinel-2 影像作为相关变量，基于遥感数据对土壤表层盐分观测筛选最佳观测指数，并构建长时间序列自变量数据集，具体依次进行如下步骤：

S31：基于前述单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和 S22 中得到的第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的土壤表层盐分含量数据，以单一波段以及波段组合计算的方法构建待筛选特征集合作为解释变量，以土壤表层盐分含量作为被解释变量，构建自变量筛选模型对待筛选特征集合中的特征（即指数）进行筛选，得到用于观测土壤表层盐分含量的最佳特征组合。需注意的是，由于单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据是空间连续的栅格数据，而 S22 中得到的第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的土壤表层盐分含量数据则是离散的点数据，因此两者在建模时需要按照土壤采样点的坐标进行数据匹配，以土壤采样点在遥感影像中的相应特征值与相同土壤采样点的土壤表层盐分含量作为样本数据。

需特别注意的是，在本步骤中，与遥感影像一起构建自变量筛选模型的是土壤表层盐分含量数据，而不是土壤剖面 1 米深的总盐分含量数据。这是由于 Sentinel-2 卫星遥感影像中的光谱只能反演土壤表面的理化信息，但无法反演深层土壤的理化信息。

在本实施例中，所选用的自变量筛选模型为随机森林（Random Forest）模型，而用于进行筛选的前述待筛选特征集合中应当包含光谱特征、植被指数特征、盐分指数特征和土壤相关指数特征四类，这四类特征中应当尽量涵盖不同的特征类型，以便于筛选得到最佳的解释特征组合，具体选择何种特征类型可根据专家经验或者前期的研究和文献进行确定。随机森林模型按按内置的两个评价指标均方误差的显着性(%IncMSE) 和节点的纯度 (IncNodePurity) 为评估准则筛选待筛选特征集合中的特征作为解释表土中土壤盐分含量的自变量，得到与表土中土壤盐分含量相关性最高的若干特征形成最佳特征组合。具体将哪些特征纳入最佳特征组合中，需要根据各自的相关性系数以及后续土壤剖面盐分估算的准确性来确定。在本实施例中，以光谱波段、植被指数、盐分指数、土壤相关指数为自变量，表土土壤盐分含量（0-0.2 米）为因变量，随机森林中树的数目为 500，构建

每棵决策树时随机抽取的变量的数目选择范围为[1,20]，模型以最小均方根误差为参数优选标准进行循环。

S32：确定最佳特征组合后，对前述月平均 Sentinel-2 影像数据集中的每一景卫星遥感影像逐像元计算前述最佳特征组合中的每个特征值，得到基于遥感影像的长时间序列指数数据集。

S4：以前述第二土壤采样点集合中各土壤采样点（大样本量）在前述长时间序列指数数据集中对应的最佳特征组合特征值作为自变量，以 S22 中得到的所有第二土壤采样点集合中各土壤采样点的 1 米深土壤剖面总盐分含量作为因变量，建立时空回归模型。最后基于前述 S32 得到的长时间序列指数数据集，利用前述训练得到的时空回归模型来预测待测区域内每一个像元所在位置的 1 米深土壤剖面盐分含量，形成待估算时期对应的 1 米深土壤剖面盐分含量的空间分布图（大空间尺度）。

需注意的是，前述长时间序列指数数据集是空间连续的栅格图，而 S22 中得到的所有第二土壤采样点集合中各土壤采样点的 1 米深土壤剖面总盐分含量则是离散的点，因此建立时空回归模型是需要按照第二土壤采样点集合中各土壤采样点的位置信息在前述长时间序列指数数据集的栅格中进行匹配，得到各土壤采样点对应的最佳特征组合中每个特征的值作为自变量。

在本实施例中，所采用的时空回归模型为基于时空卷积网络（Temporal Convolution Network）构建的回归模型，具体构建方法如下：

以 2:1 的比例随机生成训练集和测试集；对训练集和测试集分别进行归一化处理，公式为 $Y=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$；其中，$Y$ 代表归一化后的数据，X 代表待归一化的数据，X_{max} 和 X_{min} 分别代表 X 的最大值和最小值；计算后得到归一化为[-1，1]区间内的数据。

在训练集、测试集中建模中，由于前述 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列中具体的序列长度对最终的估算效果有印象，因此可实现根据模型在测试集中表现的拟合优度最高为原则筛选历史序列的长度。在本实施例中，筛选后确定历史序列自变量的长度为前两年周期内的指数集作为最优时间序列自变量。所谓前两年周期，即前述 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列为在待估算时期之前三年至待估算时期之前一年期间获得的待测区域 Sentinel-2 卫星遥感影像，时间跨度为 24

个月，影像空间分辨率为 10 米。

时空卷积网络 TCN 在训练时，设置训练集交叉验证模式为十折交叉验证，使用的模型为 TCN 回归模型，TCN 以因果卷积模块训练时间序列自变量数据集，内核初始化器为 He_normal，卷积层中的激活函数为 ReLU，每个卷积层使用的内核大小为 8，扩大卷积中跳跃参数 filter 为 1，卷积层上下文中的膨胀参数 dilation base 为 7，时间膨胀模块对应的扩张因子分别为[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256]；在对训练集进行训练时，学习率设置为 0.005、权值惩罚项参数 dropout 率的概率参数设置为 0.5，得到降低模型的损失率并提高学习率的模型；根据模型优选和参数设置，对待测区域内的每一个栅格构建自变量对因变量的回归模型，用于计算待测区域 10 米分辨率的 1 米深土壤剖面盐分含量数据。

为了进一步便于理解本发明的优点，下面将上述实施例中 S1~S4 步骤的利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法应用于一个具体的案例中，以便于展示具体的技术效果。

实施例

在本案例中，选取新疆维吾尔自治区的棉花种植田块（81°17'- 81°22'E，40°28'-40°31'N）作为研究区域，利用 2020 年 11 月 1 日以及 2019 年 11 月 2 日地面调查获取的土壤样点数据、大地电导率数据计算，得到的 1 米深土壤剖面盐分含量作为因变量，以同一时期的单景 Sentinel-2 遥感影像数据及前两年时间序列的影像数据作为自变量，基于随机森林-时空卷积网络（Random Forest-Temporal Convolution Network ，RF-TCN）构建回归模型，最终得到空间分辨率为 10 米、估算深度为 1 米的土壤剖面盐分含量空间分布数据。该估算方法的基本步骤如前述实施例的 S1~S4 所述，不再完全重复赘述，下面主要展示具体的数据和实现细节：

步骤 1）数据获取：分别在土层深度为 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 处获取研究区域的土壤剖面样品（小空间范围、小样本），同时分别在 0.75 米和 1.5 米深度测量，基于 EM38-MK2 大地电导率仪获取在水平、垂直方向上四种测量模式的电导率数据（小空间范围、大样本），并获取与地面调查时间相同的单幅 Sentinel-2 遥感影像；在相同研究区域，获取前两年时间周期内可得的 10 米分辨率 Sentinel-2 卫星遥感影像（大空间范围、长时间序列）。

其中，Sentinel-2 数据是欧洲航天局（ESA）发布的 L1 级产品。Sentinel-2 由两颗极轨卫星（Sentinel-2A 和 Sentinel-2B）组成，两颗卫星数据互补，重访周期为 5 天，轨道周期为 100 分钟，轨道高度为 786 公里。扫描宽度为 290 公里，轨道倾角为 98.62°。多光谱扫描成像数据（MSI） 在可见光至红色边缘区域提供一个空间分辨率为 60 m 的波段、三个 10 m 波段和两个 30m 波段。影像获取时间为 2015 年 10 月至 2020 年 11 月，获取共 139 景影像，该数据可在美国地质调查局 (USGS) 下载。

步骤 2）数据预处理：将步骤 1）获取的五个深度的土层样点数据处理为 1 米深的土壤剖面盐分数据；分别对于五个深度土层的实测电导率数据（$EC_{1:5}$）与 EM38-MK2 测量的土壤电导率数据进行线性回归，五个回归方程是为：

$$EC_{1:5\,(0\text{-}0.2m)}=0.102+0.013\times EC_{ah0.75}+0.018\times EC_{ah1.5}-0.002\times EC_{av0.75}+0.013\times EC_{av1.5};$$

$$EC_{1:5(0.2\text{-}0.4m)}=-0.154-0.001\times EC_{ah0.75}+0.023\times EC_{ah1.5}+0.005\times EC_{av0.75}-0.014\times EC_{av1.5};$$

$$EC_{1:5(0.4\text{-}0.6m)}=-0.247-0.012\times EC_{ah0.75}+0.027\times EC_{ah1.5}+0.001\times EC_{av0.75}-0.001\times EC_{av1.5};$$

$$EC_{1:5(0.6\text{-}0.8m)}=-0.118-0.012\times EC_{ah0.75}+0.015\times EC_{ah1.5}+0.007\times EC_{av0.75}-0.005\times EC_{av1.5};$$

$$EC_{1:5(0.8\text{-}1m)}=0.028-0.009\times EC_{ah0.75}+0.013\times EC_{ah1.5}+0.003\times EC_{av0.75}-0.004\times EC_{av1.5};$$

其中，$EC_{ah0.75}$ 代表 0.75 米深处水平模式测得的电导率，$EC_{ah1.5}$ 代表 1.5 米深处水平模式测得的电导率，$EC_{av0.75}$ 代表 0.75 米深处垂直模式测得的电导率，$EC_{av1.5}$ 代表 1.75 米深处垂直模式测得的电导率；得到与电导率数据点位数相同的 $EC_{1:5}$ 数据后，利用公式 $Y=V\times\rho\times c$ 计算得到五个土层深度的剖面盐分含量（0.2 米）；其中，Y 代表计算得到的剖面盐分含量，V 代表土体的体积，ρ 代表土壤容重，c 代表可溶性盐含量；采用累加法对计算的每 0.2 米土层的剖面盐分含量整合，计算公式为 $Y_{0\text{-}1m}=Y_{0\text{-}0.2m}+Y_{0.2\text{-}0.4m}+Y_{0.4\text{-}0.6m}+Y_{0.6\text{-}0.8m}+Y_{0.8\text{-}1m}$；其中，$Y_{0\text{-}1m}$ 代表 1 米土壤剖面盐分总含量，$Y_{0\text{-}0.2m}$，$Y_{0.2\text{-}0.4m}$，$Y_{0.4\text{-}0.6m}$，$Y_{0.6\text{-}0.8m}$，$Y_{0.8\text{-}1m}$ 分别是五个深度处剖面盐分含量；计算后 2020 年 11 月及 2019 年 11 月的 1 米土壤剖面盐分总含量样点，其中 545 个为 2020 年数据集，37 个为 2019 年数据集。

将步骤 1）获取的 Sentinel-2 遥感数据进行预处理；利用 Sentinel Application Platform (SNAP) 包中的 Sen2Cor 模块对 Sentinel-2 数据进行辐射校准和大气校正，将 MSI 图像转换为表面反射率格式输出；得到 139 景空间分辨率为 10 米的 Sentinel-2 影像；以月份为目标时间单位分类，对 139 景单幅 Sentinel-2 影像

中的全波段采用栅格逐像元计算方法计算，逐个像元地将栅格值相加并求平均值；得到 2015 年 10 月至 2020 年 11 月的逐月平均影像，共 60 期数据，每一期数据的空间分辨率为 10m、时间分辨率为 1 个月。

步骤 3）自变量筛选：对步骤 2）后处理的 2020 年 11 月 1 日的单景 Sentinel-2 影像，利用波段及波段组合计算的方法得到光谱特征、植被指数特征、盐分指数特征、土壤相关指数特征，作为待评估的自变量；对步骤 2）后处理的 2020 年 11 月 1 日的表土盐分含量数据（0-0.2 米，545 个）作为相关变量，利用 R 软件中提供的“caret”包的“varImp”函数，对每个土壤样点建立 RF 模型；该模型具体特征如下：随机森林（RF）方法按内置评价指标：均方误差的显着性 (%IncMSE) 和节点的纯度 (IncNodePurity)为评估准则筛选自变量，得到与表土中土壤盐分含量相关性高的指数。以光谱波段、植被指数、盐分指数、土壤相关指数为自变量，表土土壤盐分含量（0-0.2 米）为因变量，随机森林中树的数目为 500，构建每棵决策树时随机抽取的变量的数目选择范围为[1,20]，模型以最小均方根误差为参数优选标准进行循环。自变量筛选模型优选后得到 22 个指数作为最佳观测土壤表层盐分含量的自变量，包括：SI, S1, S2, S3, S6, S7, CRSI, SSSI-2, SI-T, SI4, NDSI, BI, CYEX, CAEX, CLEX, GVMI, RVI, GARI, DVI, EVI, OSAVI, ENDVI；各个筛选得到的自变量的全称及波段计算公式如下所示：

Explanation	Abbreviations	Formulations
Salinity index	SI	$(G + R)^{0.5}$
Salinity Index4	SI4	$SWIR_1 / NIR$
Salinity index I	S1	B / R
Salinity index II	S2	(B - R) / (B + R)
Salinity index III	S3	G × R / B
Salinity index VI	S6	R × NIR / G
Salinity index VII	S7	$(SWIR_1 - SWIR_2) / (SWIR_1 + SWIR_2)$
Salinity Index	SI-T	R / NIR × 100
Soil Salinity and Sodicity Indices2	SSSI-2	(R × NIR - NIR × NIR) / R
Normalized Difference Salinity Index	NDSI	$(NIR - SWIR_1) / (NIR + SWIR_1)$
Canopy Response Salinity Index	CRSI	$[(NIR \times R - G \times B) / (NIR \times R + G \times B)]^{0.5}$
Clay index	CLEX	$SWIR_1 / SWIR_2$
Gypsum index	GYEX	$(SWIR_1 - NIR) / (SWIR_2 + NIR)$
Carbonate index	CAEX	G / B
Brightness index	BI	$(G^2 + B^2)^{0.5}$
Ratio vegetation index	RVI	NIR / R
Enhanced Normalized Differential Vegetation Index	ENDVI	$(NIR + SWIR_1 - R) / (NIR + SWIR_2 + R)$
Green atmospherically resistant vegetation index	GARI	$\{ NIR - [G + 0.6 \times (B - R)]\} / \{ NIR + [G + 0.6 \times (B - R)]\}$
Differential Vegetation Index	DVI	NIR – R
Enhanced Vegetation Index	EVI	(1+L) × (NIR - R) / (NIR + C1 × R - C2 × B + L)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	OSAVI	(NIR - R) / (NIR + R + 0.16)
Global Vegetation Moisture Index	GVMI	$[(NIR + 0.1) - (SWIR_1 + 0.02)] / [(NIR + 0.1) + (SWIR_1 + 0.02)]$

对步骤 2）后得到的 60 期空间分辨率为 10m、时间分辨率为 1 个月的 Sentinel-2 月平均数据集进行波段组合计算，根据上述 22 个波段组合公式，分别计算逐月平均的 22 个指数。

步骤 4）土壤剖面盐分估算：基于步骤 3）得到的 22 个月平均遥感影像的长时间序列指数数据集作为自变量，以步骤 2）得到的土壤剖面 1 米深的可溶性盐含量数据作为因变量，基于时空卷积网络（Temporal Convolution Network）构建回归模型。具体方法如下：

基于步骤 2）得到的 545 个 2020 年 11 月 1 日的土壤样点，以 2:1 的比例随机生成训练集和测试集；基于步骤 2）得到的 37 个 2019 年 11 月 2 日的土壤样点作为 2019 年的测试集；为了增强模型运行的效率，对训练集和测试集分别进行归一化处理，公式为 $Y=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$；其中，$Y$ 代表归一化后的数据，X

代表待归一化的数据，X_{max} 和 X_{min} 分别代表 X 的最大值和最小值；计算后得到归一化为[-1，1]区间内的数据；在训练集、测试集中建模中，根据 TCN 模型在 2020 年测试集中表现的拟合优度最高为原则筛选时间序列的长度，筛选后以时间序列自变量的长度为前两年周期内的指数集作为最优时间序列自变量；在估算 2020 年 11 月份的土壤剖面盐分含量时，以 2017 年 10 月至 2019 年 10 月的月平均数据（24 期）作为自变量；在估算 2019 年 11 月份的土壤剖面盐分含量时，以 2016 年 10 月至 2018 年 10 月的月平均数据（24 期）作为自变量；

以十折交叉验证法对训练集进行 TCN 回归模型的训练，以因果卷积模块训练 24 期时间序列自变量数据集，内核初始化器为 He_normal，卷积层中的激活函数为 ReLU，每个卷积层使用的内核大小为 8，扩大卷积中跳跃参数 filter 为 1，卷积层上下文中的膨胀参数 dilation base 为 7，时间膨胀模块对应的扩张因子分别为[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256]；在对训练集进行训练时，学习率设置为 0.005、权值惩罚项参数 dropout 率的概率参数设置为 0.5，得到降低模型的损失率并提高学习率的模型；在 2020 年的建模和测试以及 2019 年数据集上的测试中，根据模型优选和参数设置，对待测区域内的每一个栅格构建自变量对因变量的回归模型，得到 2020 年 11 月和 2019 年 11 月的待测区域 10 米分辨率的 1 米深土壤剖面盐分含量数据。

选取 2020 年的 545 个地面样点和 2019 年的 37 个地面样点作为验证点，如图 1 所示，以本实施例估算的 1 米土壤剖面盐分含量在 2020 年数据训练集（a）和 2020 年测试集（b）中表现良好，在训练集中 R^2=0.66，在测试集中 R^2=0.65；在时间尺度的迁移能力验证上，以本实施例估算的 1 米土壤剖面盐分含量在 2019 年数据测试集上精度可信，在测试集中 R^2=0.71。

选取新疆维吾尔自治区的棉花种植田块作为研究区，以本实施例估算得到的 2020 年、2019 年 1 米土壤剖面的盐分含量分布图如图 2 所示，空间分辨率为 10 米。

以上所述的实施例只是本发明的一种较佳的方案，然其并非用以限制本发明。有关技术领域的普通技术人员，在不脱离本发明的精神和范围的情况下，还可以做出各种变化和变型。因此凡采取等同替换或等效变换的方式所获得的技术方案，均落在本发明的保护范围内。

权 利 要 求 书

1. 一种利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，步骤如下：

S1：获取待测区域在待估算时期下对应的单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和地面调查数据；同时获取待测区域在待估算时期之前的 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列；

其中，所述地面调查数据包含在待估算时期采集的多深度实测电导率数据和 EM38-MK2 电导率数据；所述多深度实测电导率数据中包含了第一土壤采样点集合中每个土壤采样点的分段电导率数据，所述分段电导率数据包含土壤采样点所在位置深度为 1 米的土壤剖面按照设定间隔分段采样后实测得到的不同土层深度各自的电导率，其中土壤表面所在的一段土层为土壤表层；所述 EM38-MK2 电导率数据包含第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的多模式电导率数据，所述多模式电导率数据包含土壤采样点所在位置在不同深度分别按照不同模式测得的多个电导率；且第一土壤采样点集合为第二土壤采样点集合的子集；

S2：将 S1 中获取的三类数据按照 S21~S23 进行多源数据匹配处理：

S21：针对第一土壤采样点集合中的每个土壤采样点对应的分段电导率数据和多模式电导率数据进行线性回归，使线性回归模型能够基于所述多模式电导率数据估计同一土壤采样点的所述分段电导率数据；

S22：针对第二土壤采样点集合中的每个土壤采样点，利用所述线性回归模型估计每个土壤采样点对应的 5 个土层深度各自的电导率，并根据电导率换算得到土壤剖面不同土层深度处的盐分含量，对不同土层深度整合后得到 1 米深土壤剖面总盐分含量；

S23：对 S1 获得的 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列的时间分辨率进行规范化处理，得到空间分辨率和时间分辨率均统一的月平均 Sentinel-2 影像数据集；

S3：基于所述单景 Sentinel-2 卫星遥感影像数据和 S22 中得到的第二土壤采样点集合中每个土壤采样点的土壤表层盐分含量数据，以单一波段以及波段组合计算的方法构建待筛选特征集合作为解释变量，以土壤表层盐分含量作为被解释变量，构建自变量筛选模型对待筛选特征集合中的特征进行筛选，得到用于观测土壤表层盐分含量的最佳特征组合；再对所述月平均 Sentinel-2 影像数据集中的

每一景卫星遥感影像逐像元计算所述最佳特征组合中的每个特征值，得到基于遥感影像的长时间序列指数数据集；

S4：以所述第二土壤采样点集合中各土壤采样点在所述长时间序列指数数据集中对应的最佳特征组合特征值作为自变量，以 S22 中得到的所有第二土壤采样点集合中各土壤采样点的 1 米深土壤剖面总盐分含量作为因变量，建立时空回归模型；最后基于所述长时间序列指数数据集，利用时空回归模型来预测待测区域内每一个像元所在位置的 1 米深土壤剖面盐分含量，形成待估算时期对应的 1 米深土壤剖面盐分含量的空间分布图。

2. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述多深度实测电导率数据中，每个土壤采样点处深度为 1 米的土壤剖面按照 0.2m 的间隔分别在 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 进行分段采样，并测定每一段土壤的电导率，得到 5 个土层深度各自的电导率构成所述多深度实测电导率数据。

3. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述 EM38-MK2 电导率数据中，每个土壤采样点处利用 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米和 1.5 米深度分别按照水平和垂直模式测得 4 个电导率，构成所述多模式电导率数据。

4. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述 Sentinel-2 卫星遥感影像历史序列为在待估算时期之前三年至待估算时期之前一年期间获得的待测区域 Sentinel-2 卫星遥感影像，时间跨度为 24 个月，影像空间分辨率为 10 米。

5. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述线性回归模型的形式为：

$$EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}=A+B\times EC_{ah0.75}+C\times EC_{ah1.5}+D\times EC_{av0.75}+E\times EC_{av1.5}$$

其中，$EC_{1:5\ (a\text{-}bm)}$代表 a-b m 土层深度对应的电导率，$EC_{ah0.75}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米深处按水平模式测得的电导率，$EC_{ah1.5}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 1.5 米深处按水平模式测得的电导率，$EC_{av0.75}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 0.75 米深处按垂直模式测得的电导率，$EC_{av1.5}$代表 EM38-MK2 大地电导率仪在 1.75 米按深处垂直模式测得的电导率，A、B、C、D、E 分别表

示五个回归系数。

6. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述 S22 中，根据电导率换算土壤剖面不同土层深度处的盐分含量时，先根据电导率换算可溶性盐含量，再根据可溶性盐含量计算土壤中的盐分含量。

7. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述 S22 中，对不同土层深度整合得到 1 米深土壤剖面总盐分含量所用的整合方法为累加法，累加公式为：

$$Y_{0\text{-}1m}=Y_{0\text{-}0.2m}+Y_{0.2\text{-}0.4m}+Y_{0.4\text{-}0.6m}+Y_{0.6\text{-}0.8m}+Y_{0.8\text{-}1m}$$

其中，$Y_{0\text{-}1m}$代表 1 米深土壤剖面总盐分含量，$Y_{0\text{-}0.2m}$，$Y_{0.2\text{-}0.4m}$，$Y_{0.4\text{-}0.6m}$，$Y_{0.6\text{-}0.8m}$，$Y_{0.8\text{-}1m}$分别是 0-0.2m, 0.2-0.4m, 0.4-0.6m, 0.6-0.8m, 0.8-1m 五个土层深度处的盐分含量。

8. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述月平均 Sentinel-2 影像数据集中的每一景卫星遥感影像由同一个月中所有 Sentinel-2 卫星遥感影像平均得到。

9. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述 S3 中，所述的自变量筛选模型为随机森林模型，所述待筛选特征集合中包含光谱特征、植被指数特征、盐分指数特征和土壤相关指数特征；随机森林模型按均方误差的显着性和节点的纯度筛选待筛选特征集合中的特征，得到与表土中土壤盐分含量相关性最高的若干特征形成最佳特征组合。

10. 根据权利要求 1 所述利用时间序列遥感影像联合估算土壤剖面盐分的方法，其特征在于，所述 S4 中的时空回归模型为基于时空卷积网络构建的回归模型。

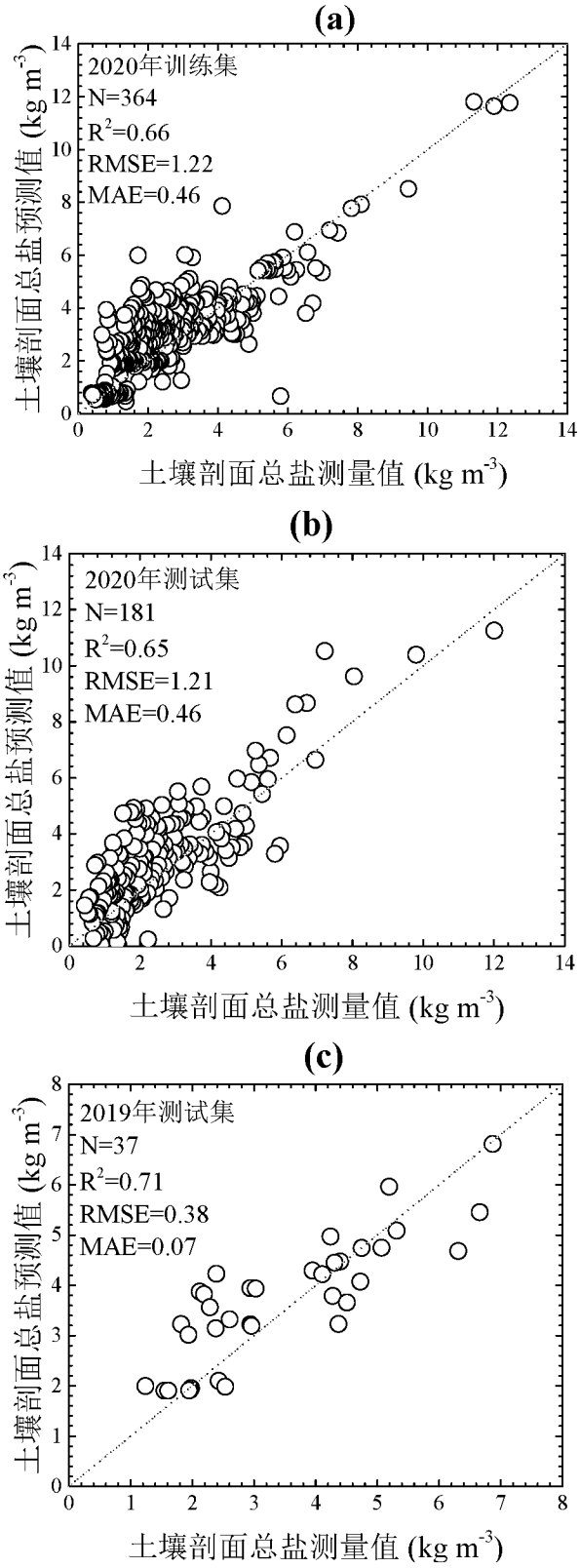

(a)
2020年训练集
N=364
R²=0.66
RMSE=1.22
MAE=0.46
土壤剖面总盐预测值 (kg m⁻³)
土壤剖面总盐测量值 (kg m⁻³)
(b)
2020年测试集
N=181
R²=0.65
RMSE=1.21
MAE=0.46
土壤剖面总盐预测值 (kg m⁻³)
土壤剖面总盐测量值 (kg m⁻³)
(c)
2019年测试集
N=37
R²=0.71
RMSE=0.38
MAE=0.07
土壤剖面总盐预测值 (kg m⁻³)
土壤剖面总盐测量值 (kg m⁻³)

图 1

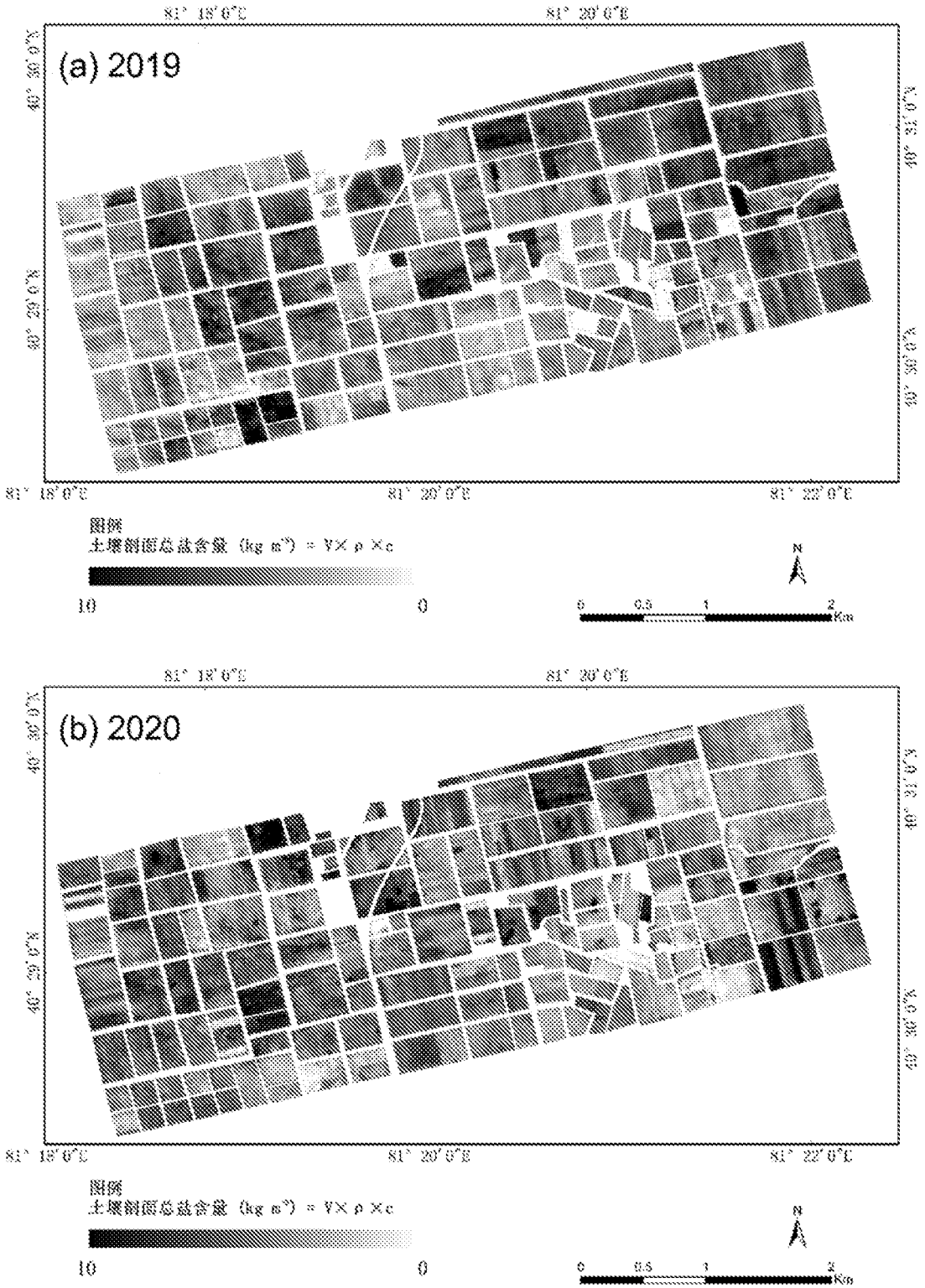

(a) 2019
81° 18'0"E
81° 20'0"E
81° 22'0"E
40° 36'0"N
40° 34'0"N
40° 32'0"N
图例
土壤剖面总盐含量（kg m⁻³）= V× ρ ×c
10
0
N
0 0.5 1 2
Km
(b) 2020
81° 18'0"E
81° 20'0"E
81° 22'0"E
40° 36'0"N
40° 34'0"N
40° 32'0"N
图例
土壤剖面总盐含量（kg m⁻³）= V× ρ ×c
10
0
N
0 0.5 1 2
Km

图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2022/132570

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N27/04(2006.01)i;G01S19/14(2010.01)i;G06V20/13(2022.01)i;G06V10/75(2022.01)i;G06V10/764(2022.01)i;G06V10/774(2022.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC:G01N G01S G06V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; WPABS; ENTXT; VEN; WPABSC; ENTXTC; CNKI; 万方, WAFANG; Web of Science; IEEE: 浙江大学, 史舟, 王楠, 彭杰, 薛杰, 遥感影像, 时间序列, 土壤, 盐分, 电导, remote sensing image, time sequence, salt, conduct+, soil

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 114062439 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 18 February 2022 (2022-02-18) claims 1-10	1-10
A	CN 113125383 A (YAOXIANG TECHNOLOGY DEVELOPMENT (BEIJING) CO., LTD.) 16 July 2021 (2021-07-16) description, paragraphs [0005]-[0024]	1-10
A	CN 113221445 A (SHANDONG NORMAL UNIVERSITY) 06 August 2021 (2021-08-06) entire document	1-10
A	US 2015347647 A1 (ITERIS INC.) 03 December 2015 (2015-12-03) entire document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
01 February 2023	**09 February 2023**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) **China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088**	
Facsimile No. **(86-10)62019451**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2022/132570

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 114062439 A	18 February 2022	CN 114062439 B	23 August 2022
CN 113125383 A	16 July 2021	None	
CN 113221445 A	06 August 2021	None	
US 2015347647 A1	03 December 2015	US 9579700 B2	28 February 2017

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2022/132570

A. 主题的分类

G01N27/04(2006.01)i;G01S19/14(2010.01)i;G06V20/13(2022.01)i;G06V10/75(2022.01)i;G06V10/764(2022.01)i;G06V10/774(2022.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC:G01N G01S G06V

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用）)

CNABS;CNTXT;WPABS;ENTXT;VEN;WPABSC;ENTXTC;CNKI;万方;Web of Science;IEEE:浙江大学，史舟，王楠，彭杰，薛杰，遥感影像，时间序列，土壤，盐分，电导，remote sensing image, time sequence, salt, conduct+, soil

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 114062439 A (浙江大学) 2022年2月18日 (2022-02-18) 权利要求1-10	1-10
A	CN 113125383 A (遥相科技发展（北京）有限公司) 2021年7月16日 (2021-07-16) 说明书第[0005]-[0024]段	1-10
A	CN 113221445 A (山东师范大学) 2021年8月6日 (2021-08-06) 全文	1-10
A	US 2015347647 A1 (ITERIS INC) 2015年12月3日 (2015-12-03) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：
"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件
"D" 申请人在国际申请中引证的文件
"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利
"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）
"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件
"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件
"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件
"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性
"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性
"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2023年2月1日	2023年2月9日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	沈育德
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (+86) 0512-88996635

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2022/132570

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	114062439	A	2022年2月18日	CN	114062439	B	2022年8月23日
CN	113125383	A	2021年7月16日		无		
CN	113221445	A	2021年8月6日		无		
US	2015347647	A1	2015年12月3日	US	9579700	B2	2017年2月28日