



MODFLOW- Central Sands

Modflow-setup在美国Central Sands地下水研究中的具体应用。



地下水抽取与湖泊地下水的联系。

小范围的高分辨率的地下水模拟区域，覆盖研究的湖泊和河流；大范围的低分辨率的模拟，覆盖地下水抽取的位置。

因此，建立了3个地下水模型：一个区域模型（扩展至大部分的水文边界）和2个inset模型（嵌套模型），集中在湖泊附近。

2012~2018用于参数估计（history matching），使用地下水位、湖水位和河流径流

通过一个土壤-水平衡水文模型，考虑气象数据。用于评估农业灌溉的需水量和区域模型的边界条件施加。

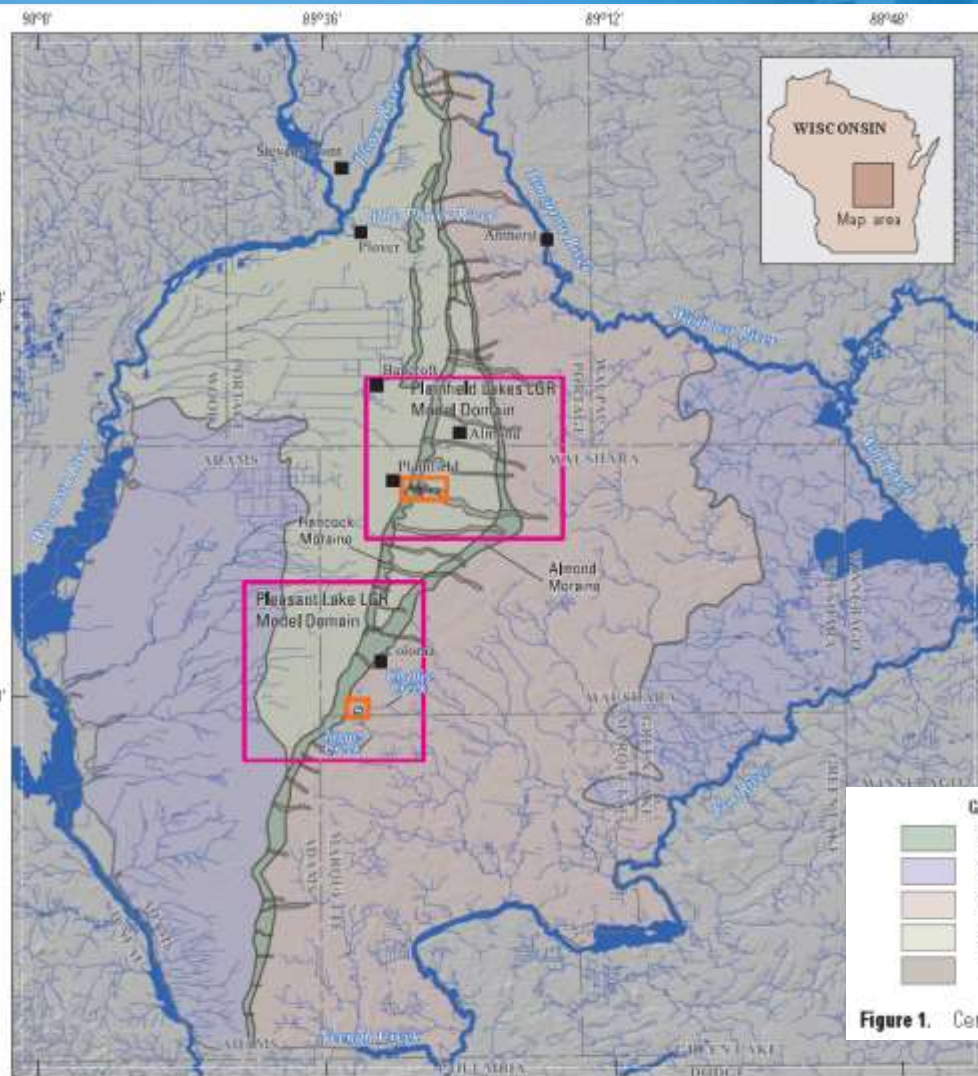
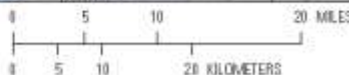


Figure 1. Central Sands region study area extent, moraines, streams, and study lakes, central Wisconsin.

Digitized from Wisconsin Department of Natural Resources, 2019.
Hydrologic features from McKay and others, 2012

EXPLANATION

[WDNR, Wisconsin Department of Natural Resources;
LGR, local grid refinement]



区域模型研究范围



模型网格和分层

区域模型分为均匀的**572**行，**533**列（结构）网格，单元大小**200m**。

模型分**4**层的水文地质单元，包括：

Layer 1---上部冰川层（表层含水层），表征不分选的冰川泥沙（东边）和更均匀的冰川泥沙（西边）；

Layer 2---中间冰川层

Layer 3---底部冰川层

Layer 4---基岩层，表征砂岩基岩。

Layer 1是由**10m DEM**重采样，**Layer 1**和**Layer 2**的底部高程是由上部的粗砂层和中间细沙层的底部定义的。**Layer 3**的底部是砂岩基岩单元的顶部，**Layer 4**的底部是**Precambrian**基岩的顶部。其他的模型分层的地质信息参考技术报告。



边界条件

空间平均的净渗透（含水层补水）在3.9-23.6 in/y，如图4，净渗流使用MODFLOW RCH软件包定义。

区域模型中考虑抽水井，见图3，抽水井使用WEL软件包定义。井的位置分配到模型分层，井的开阔间距内有最高的传导度。

侧向水流边界使用MODFLOW GHB软件包定义。这些水流边界包括：河流。GHB软件的传导度设置为 $0.5\text{m}^2/\text{d}$ ，假设1m厚河床，等价于 $1.25 \times 10^{-5}\text{m}/\text{d}$ 的垂向水力传导度。

侧向水流边界形成区域模型的活动区域，除了南边边界（没有河流，不影响湖泊附近的地下水）。因此，南边边界设置为no-flow边界。

河流使用MODFLOW-NWT的SFR2软件包表征。SFR2输入使用SFRmaker软件定义。河床垂向水力传导度需要率定，最终取值 $1\text{m}/\text{d}$ ，取值范围： $0.03 \sim 80.5\text{m}/\text{d}$ 。



边界条件

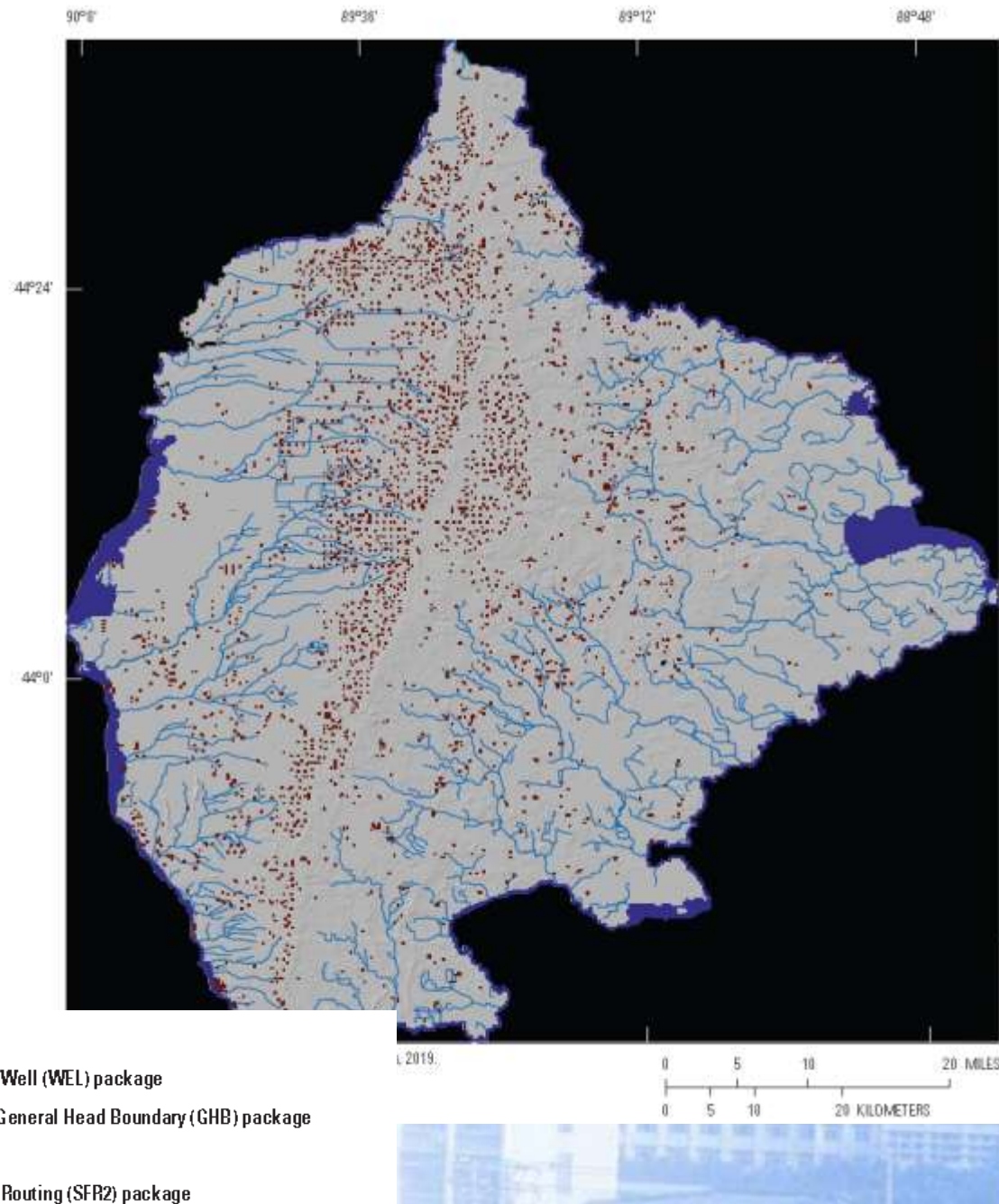
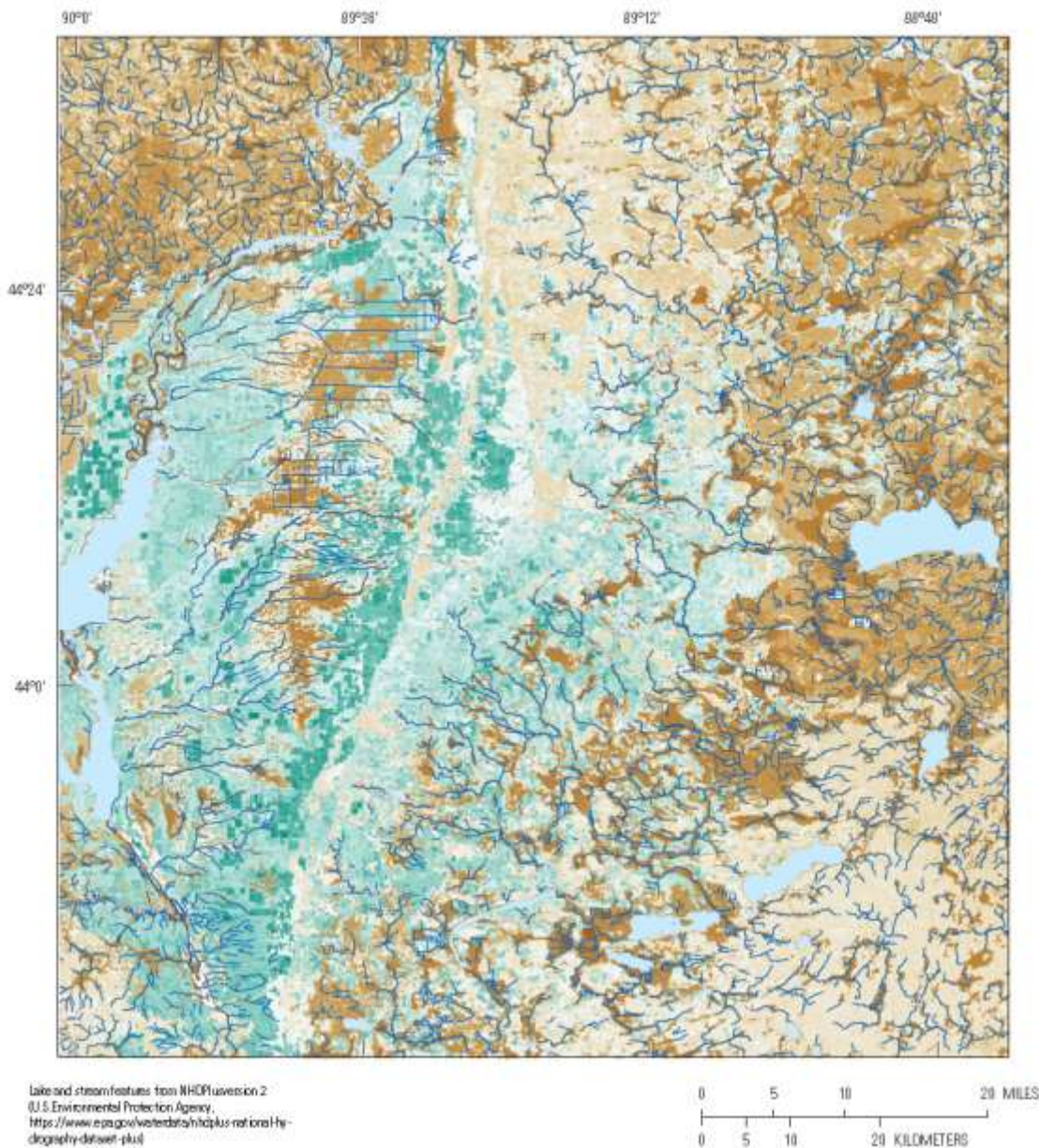


Figure 3. Model boundary conditions used for the regional groundwater-flow model, Central Sands region, central Wisconsin.



EXPLANATION

Mean annual net infiltration, in millimeters per year

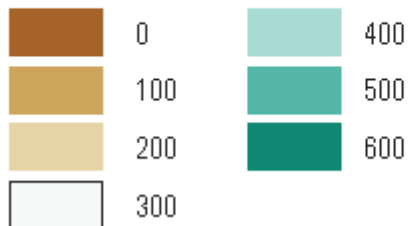


图4 水文模型计算的平均年净渗流（2012-2018）



含水层特性

初始的水平水力传导度，使用粗细泥沙比例估算

Layer1-3的水平水力传导度在0.09~152m/d

垂向水力传导度在0.002~2.93m/d

经过率定的模型水平水力传导度的含水层特性，见图5

垂向水力传导度，见图6

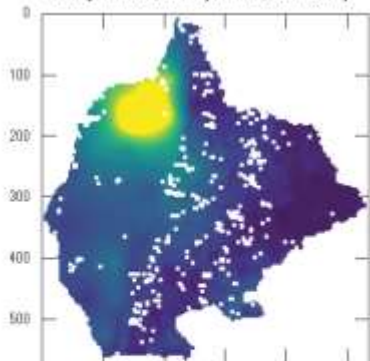
Specific yield，见图7

specific storage，见图8



艰苦朴素
求真务实

A. Layer 1 horizontal hydraulic conductivity



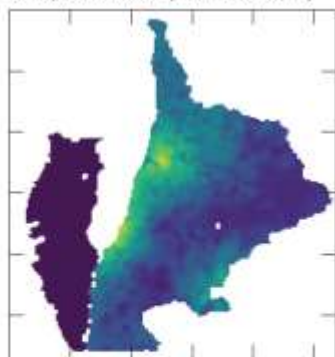
EXPLANATION

[Minimum is 6 meters per day, maximum is 152 meters per day, mean is 46 meters per day]



Horizontal hydraulic conductivity, in meters per day

B. Layer 2 horizontal hydraulic conductivity



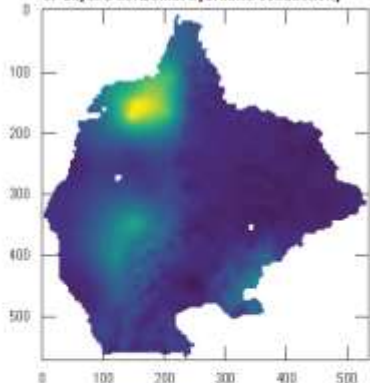
EXPLANATION

[Minimum is 8.09 meters per day, maximum is 54 meters per day, mean is 13 meters per day]



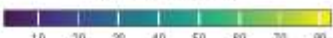
Horizontal hydraulic conductivity, in meters per day

C. Layer 3 horizontal hydraulic conductivity



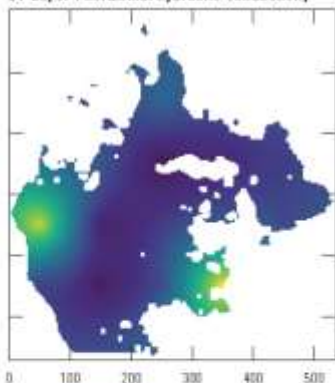
EXPLANATION

[Minimum is 2 meters per day, maximum is 83 meters per day, mean is 18 meters per day]



Horizontal hydraulic conductivity, in meters per day

D. Layer 4 horizontal hydraulic conductivity



EXPLANATION

[Minimum is 8.47 meters per day, maximum is 32 meters per day, mean is 9 meters per day]



Horizontal hydraulic conductivity, in meters per day

经过率定的模型水平水力传导度的含水层特性，见图5

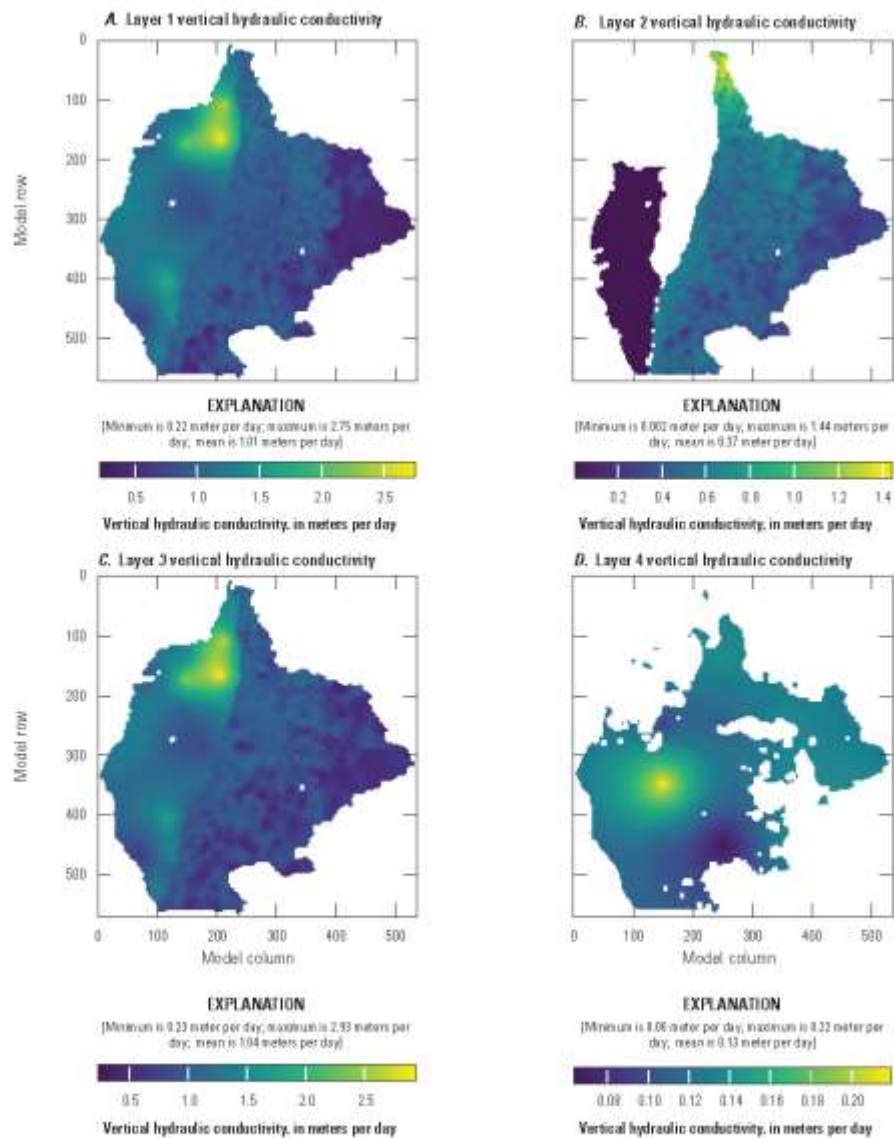
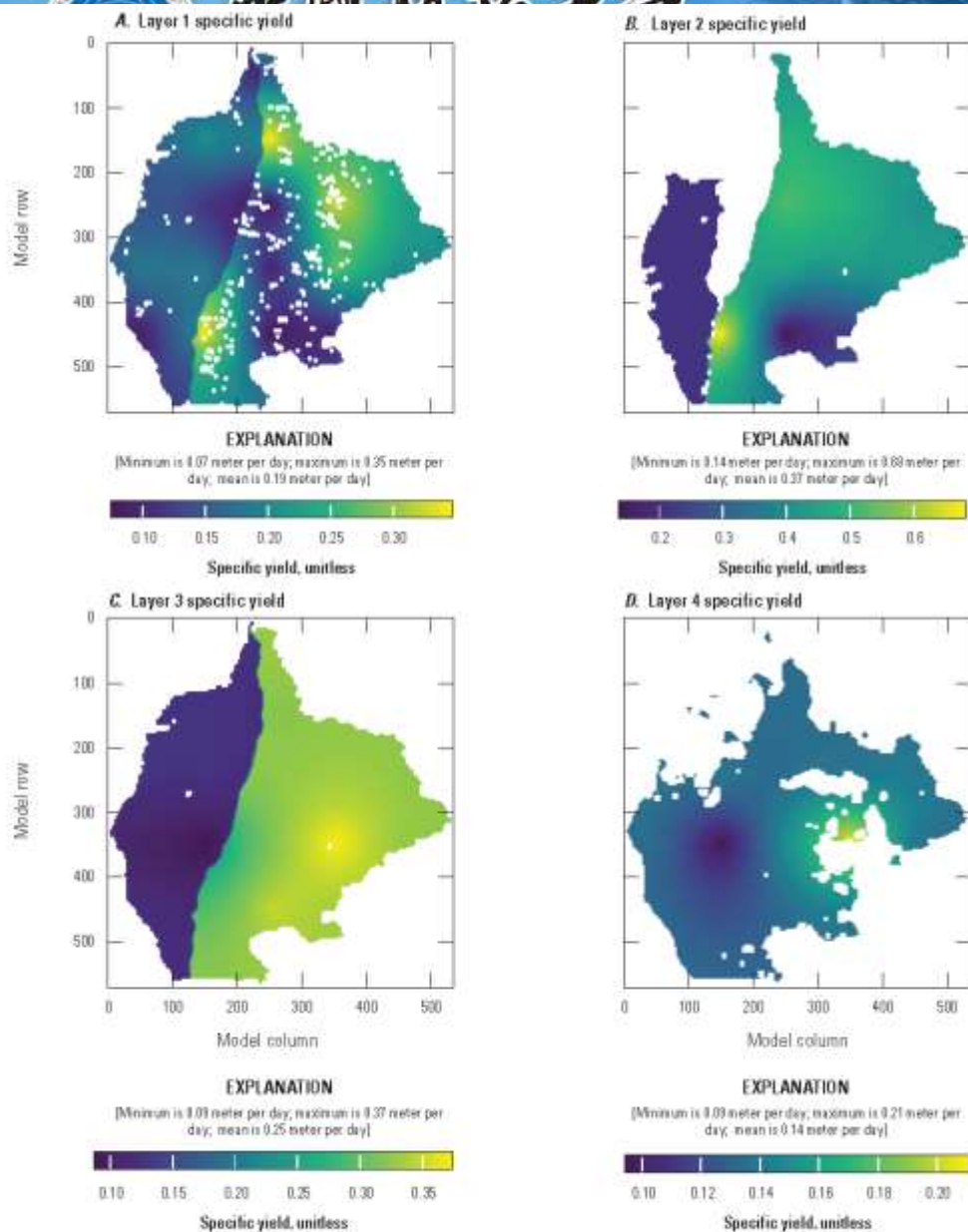


Figure 6. Vertical hydraulic conductivity values after history matching for each of the four regional model layers (A, layer 1 [upper glacial]; B, layer 2 [middle glacial layer including New Rome Member where present]; C, layer 3 [lower glacial]; and D, layer 4 [sandstone bedrock]) in the Central Sands region, central Wisconsin.

垂向水力传导度，见图6



Specific yield, 见图7

Figure 7. Specific-yield values after history matching for each of the four regional model layers [A, layer 1 (upper glacial); B, layer 2 (middle glacial layer including New Rome Member where present); C, layer 3 (lower glacial); and D, layer 4 (sandstone bedrock)] in the Central Sands region, central Wisconsin.



艰苦朴素
求真务实

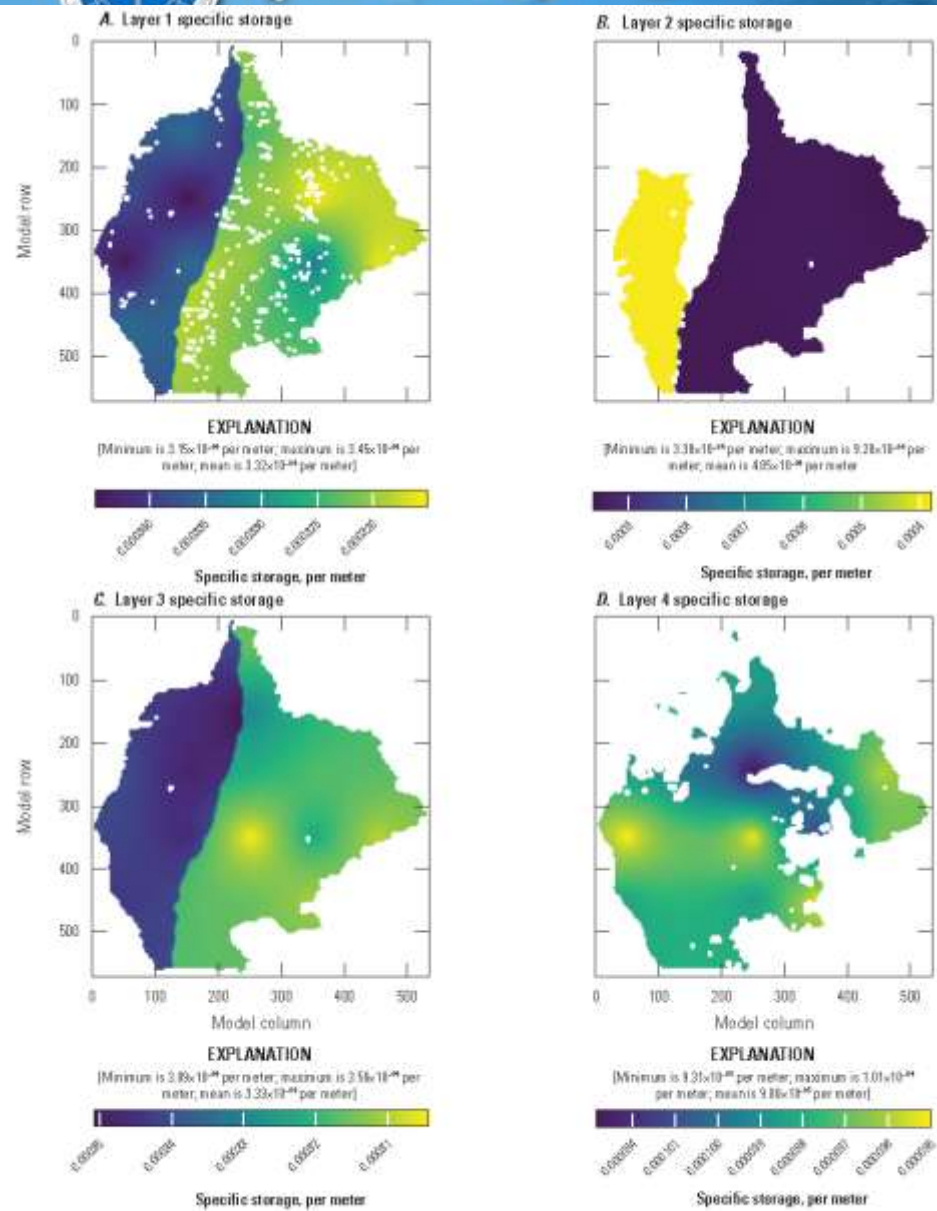


Figure 8. Specific-storage values after history matching for each of the four regional model layers [A, layer 1 (upper glacial); B, layer 2 (middle glacial layer including New Rome Member where present); C, layer 3 (lower glacial); and D, layer 4 (sandstone bedrock)] in the Central Sands region, central Wisconsin.

specific storage, 见图8



模型率定

地下水水头和河流的测量值用于模型率定，见表1

数据共收集至177条河流和464个井，以及湖泊水位观测。

参数估计PEST++

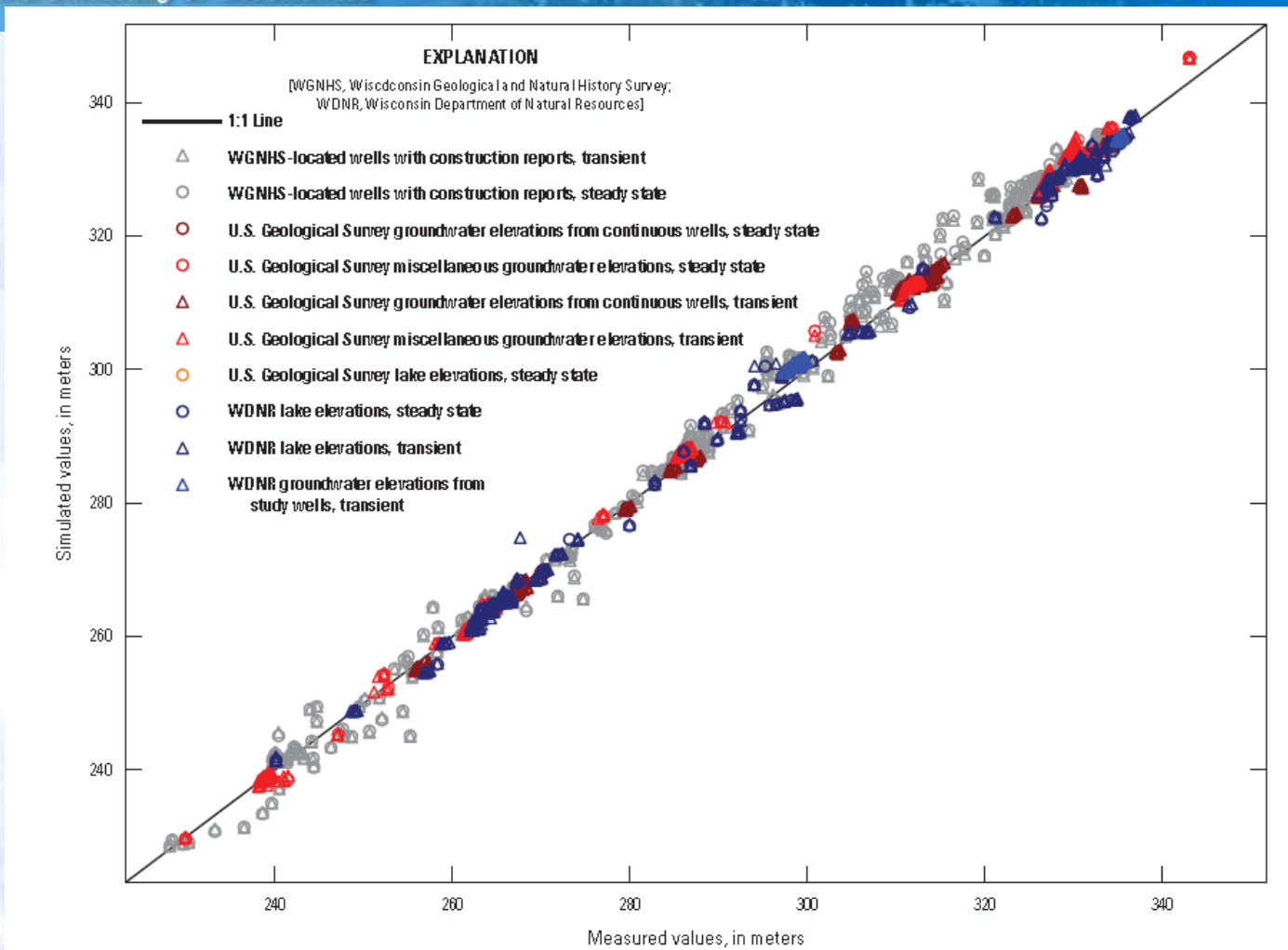
实测值与计算值的比较，湖水位和地下水位，见图9

河流流量比较见图10

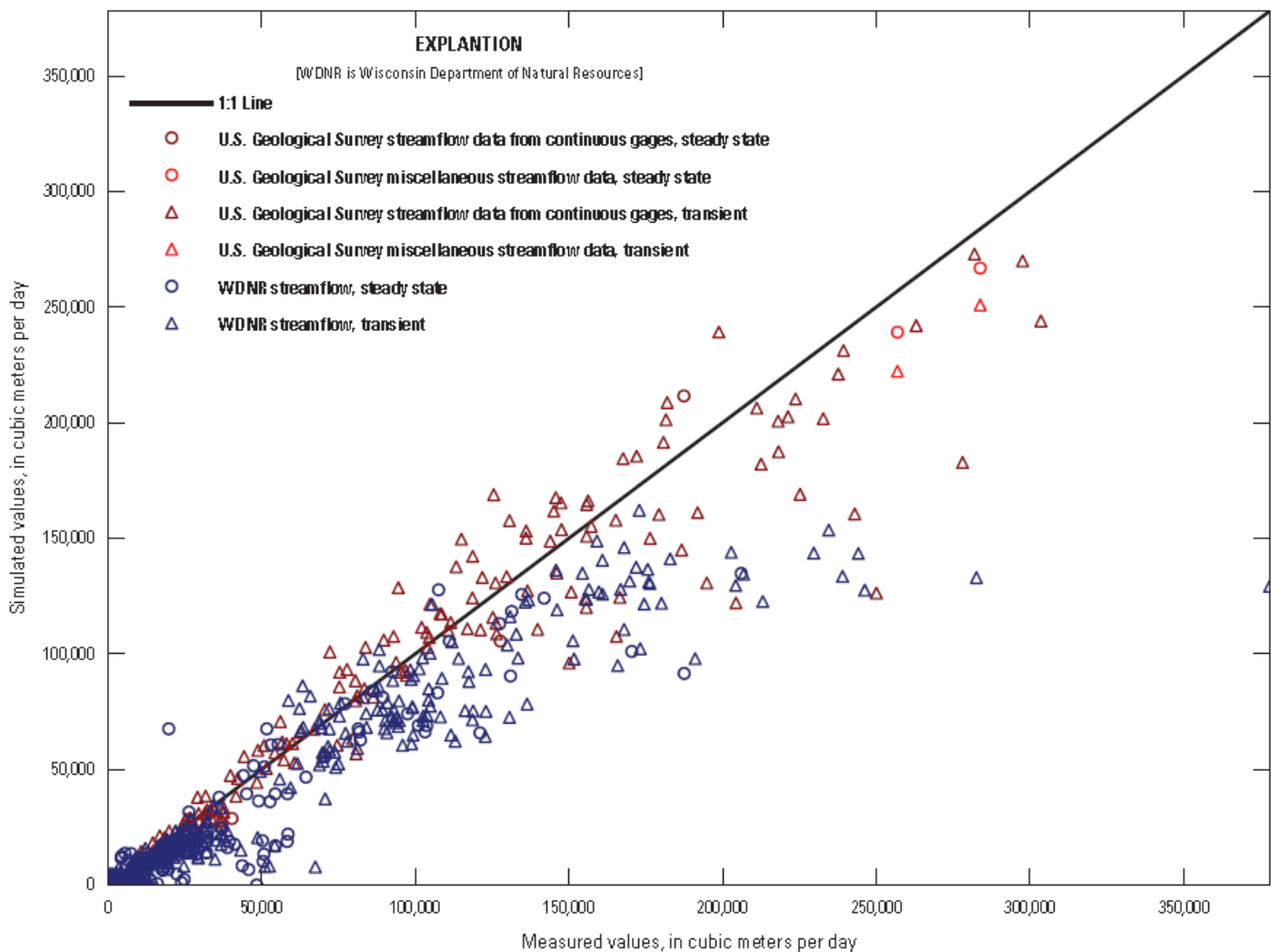


表1 实测的地下水头和河流数据（模型率定用）

Group name in the PEST files	Target type	Description	Number of locations	Data source
hds_wgnhs_tr, heads_wgnhs	Head	Well-construction report groundwater elevation measured after a well was drilled. Locations were determined by the WGNHS.	299	WDNR, 2022
nwis_dvs, nwis-dvs_tr	Head	Groundwater elevations at locations with daily data that were collected by the USGS.	31	USGS, 2021
nwis_fm, nwisfm_tr	Head	Groundwater elevations at locations with miscellaneous measurements that were measured by the USGS.	23	USGS, 2021
wdnr_wells	Head	Wells installed for this study and measured by WGNHS and WDNR.	36	WDNR, 2022
wdnr_lakes, wdn-rllks_tr	Head	Lake elevations measured by the WDNR.	70	WDNR, 2022
usgs_stages	Head	Lake elevation measured by the USGS.	5	USGS, 2021
nr_diff	Head difference (vertical)	Hydraulic-head difference measurement across New Rome Member.	1	Hart and others (2015)
hd_diff	Head difference (temporal)	Calculated as the difference between two hydraulic-head measurements made at the same location for any hydraulic-head dataset where two or more measurements were made.	1,573 differences; some locations have multiple differences if more than 2 groundwater elevations were collected.	All hydraulic-head target datasets in this table.
nwis_dy_flx, nwisd-vflx_tr	Streamflow	Streamflow measurements at USGS streamgages with daily data. Data have been adjusted using base-flow separation techniques to reflect base-flow conditions.	6	USGS, 2021
nwis_fm_flx, nwis-fmflx_tr	Streamflow	Miscellaneous streamflow measurements collected by the USGS. Data have been adjusted to base-flow conditions using streamgages with daily data.	5	USGS, 2021
wdnr_miscflx, wdn-rflx_tr	Streamflow	WDNR streamflow measurements made during base-flow conditions. No adjustments made.	166	WDNR, 2022



实测值与计算值的比较，湖水位和地下水位，见图9



河流流量比较见图10

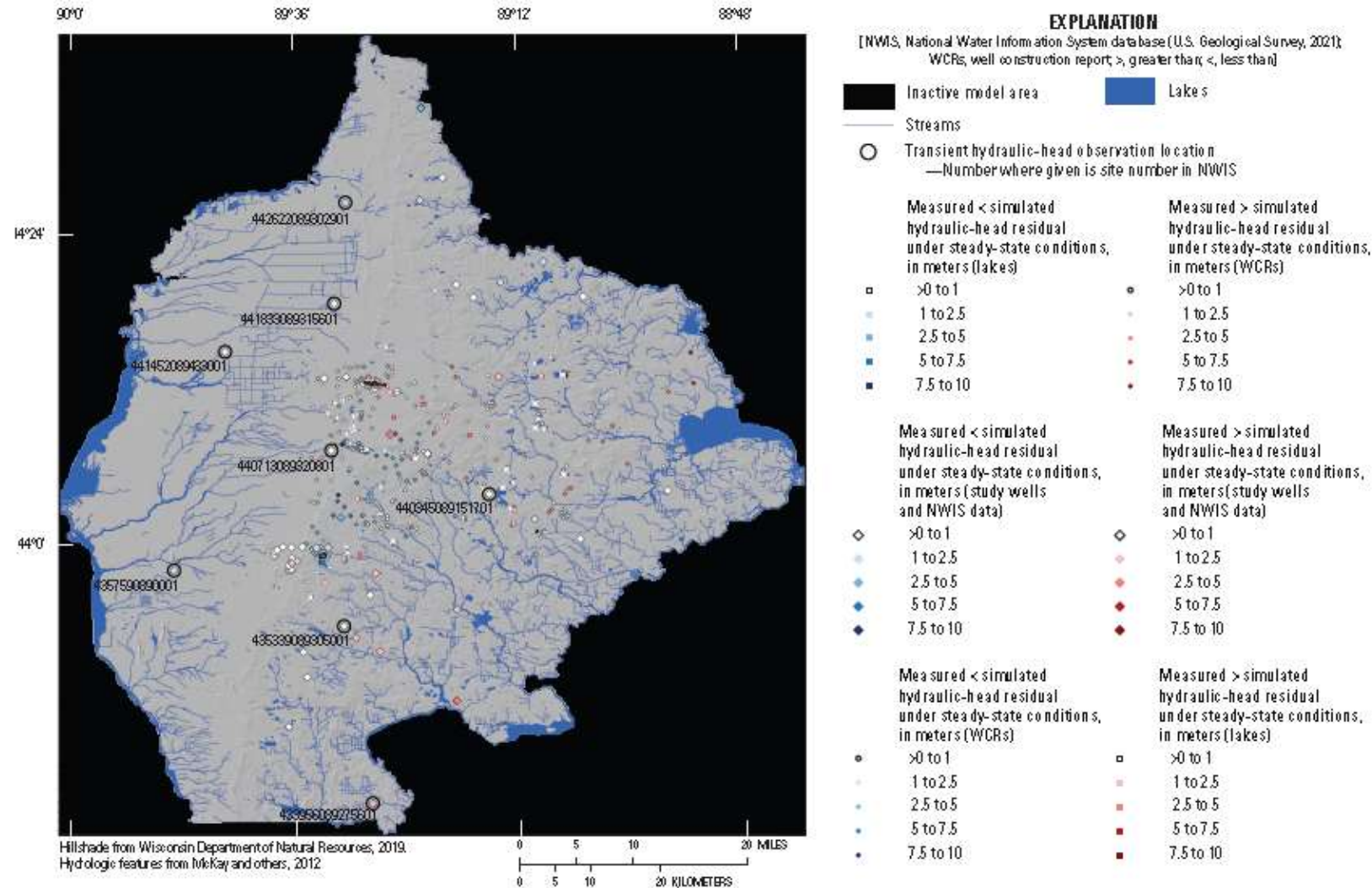


Figure 11. Steady-state hydraulic-head (water-level) target residuals displayed by calibration group for the regional model, Central Sands region, central Wisconsin.

恒定态水头和河流的实测值与计算值之差，如图11和图12

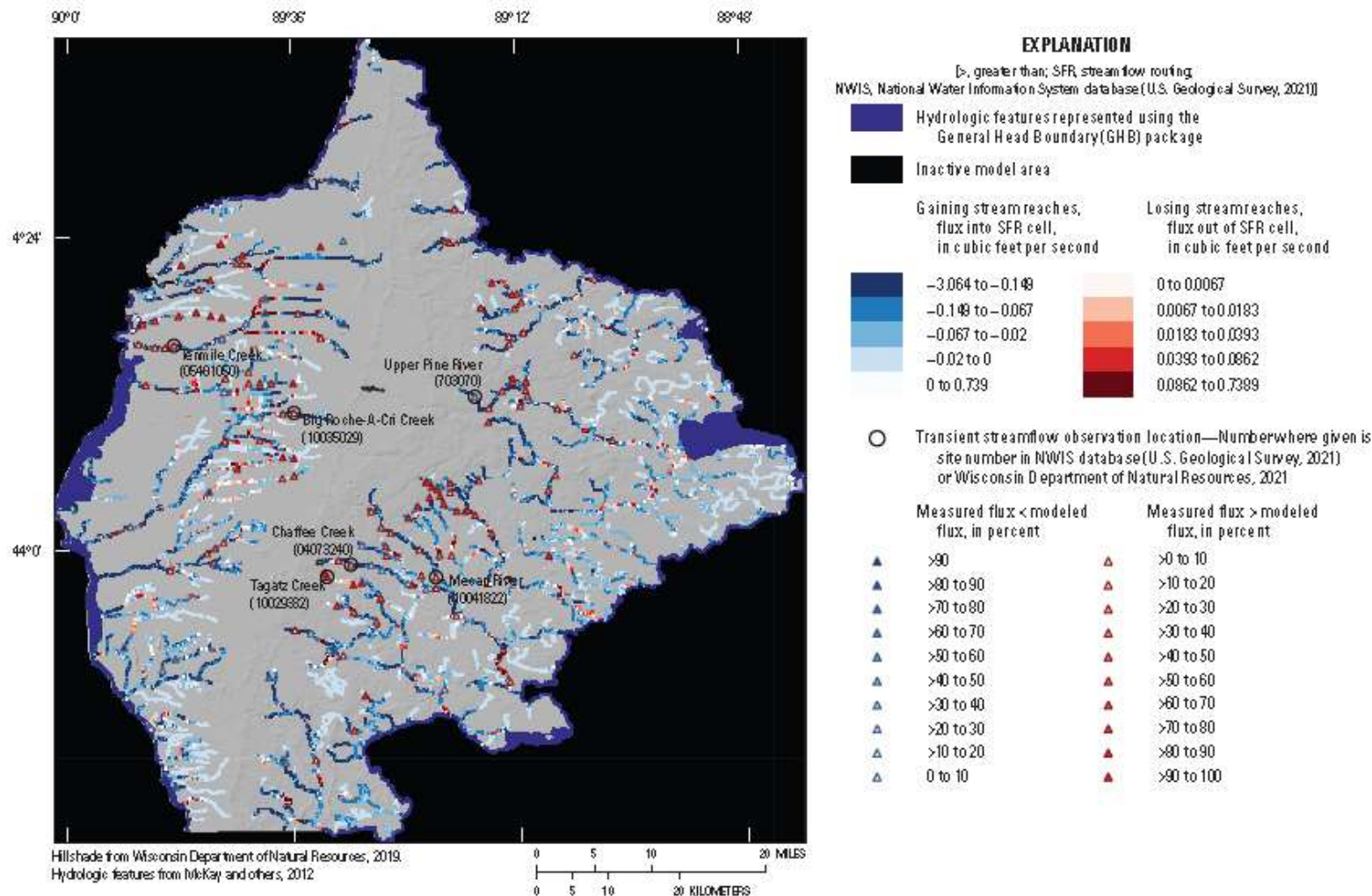


Figure 12. Steady-state streamflow residuals and gaining and losing stream reaches for the regional model, Central Sands region, central Wisconsin.

过渡水头和河流的实测值（选择部分的井和河流），见图13和图14

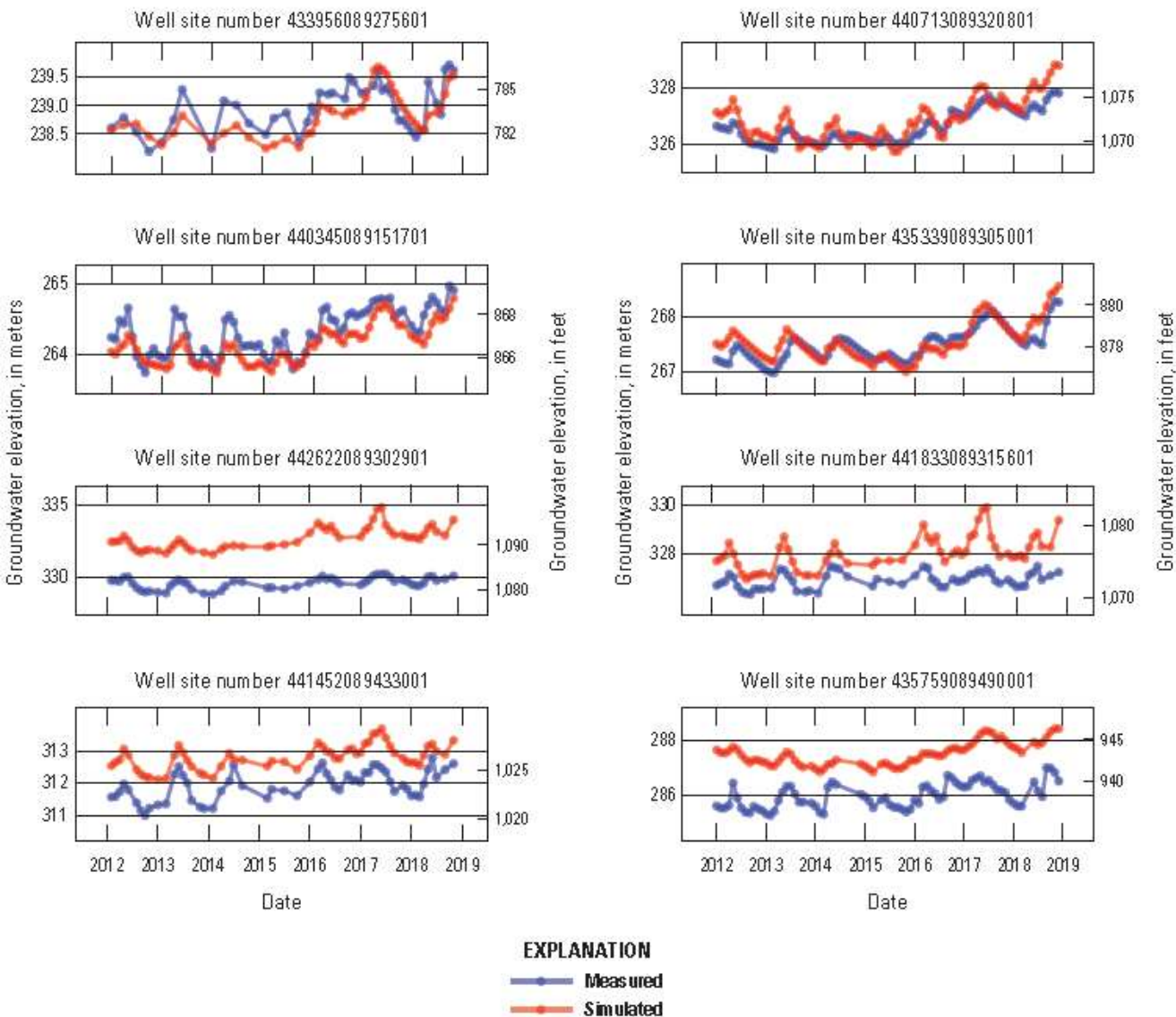


图13 模拟的地下
水位（选择的部分
井，井位置见图11）



艰苦朴素
求真务实

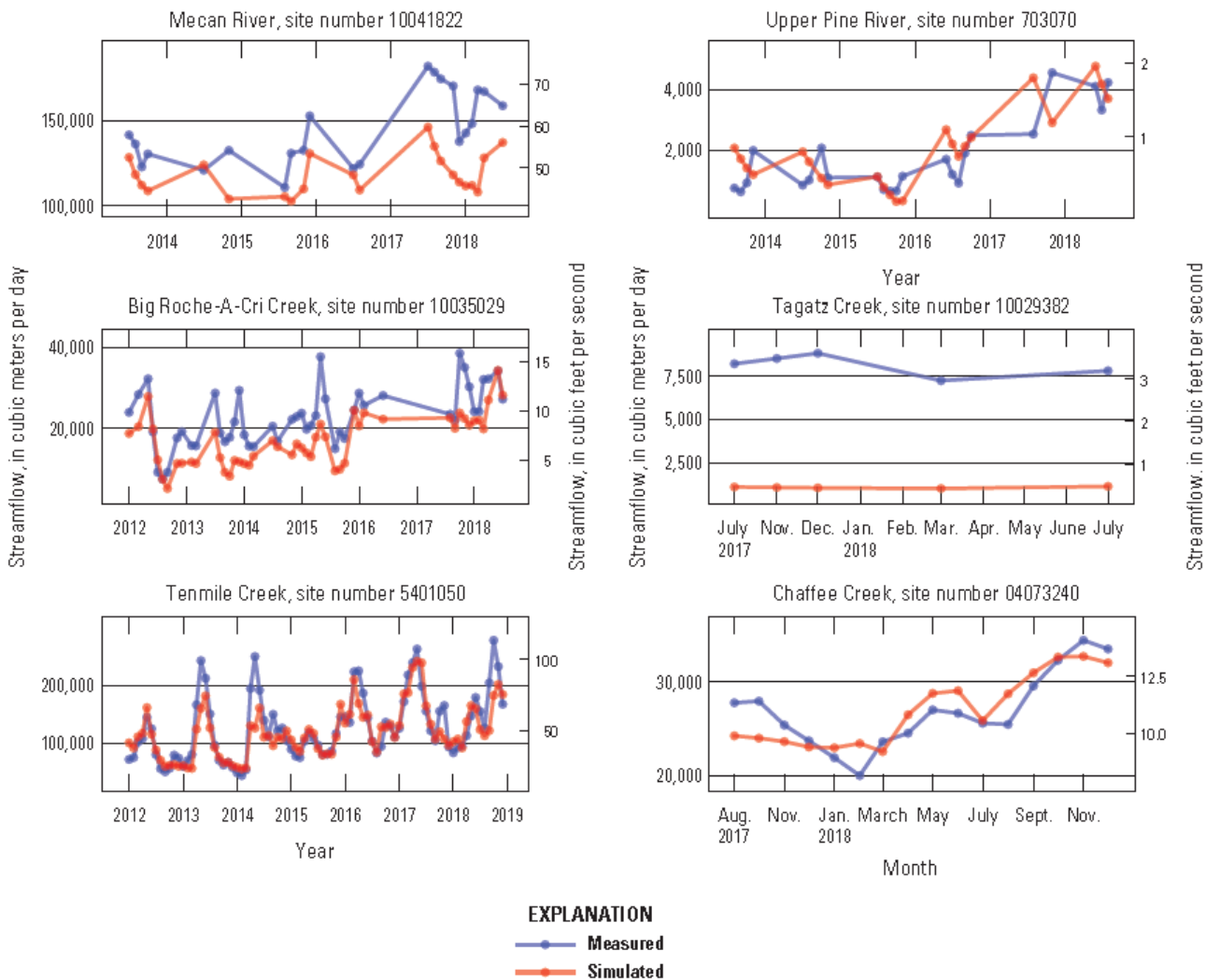


图14 在研究湖泊附近选择河流位置的模拟的过渡性河道流量（用于率定区域模型）

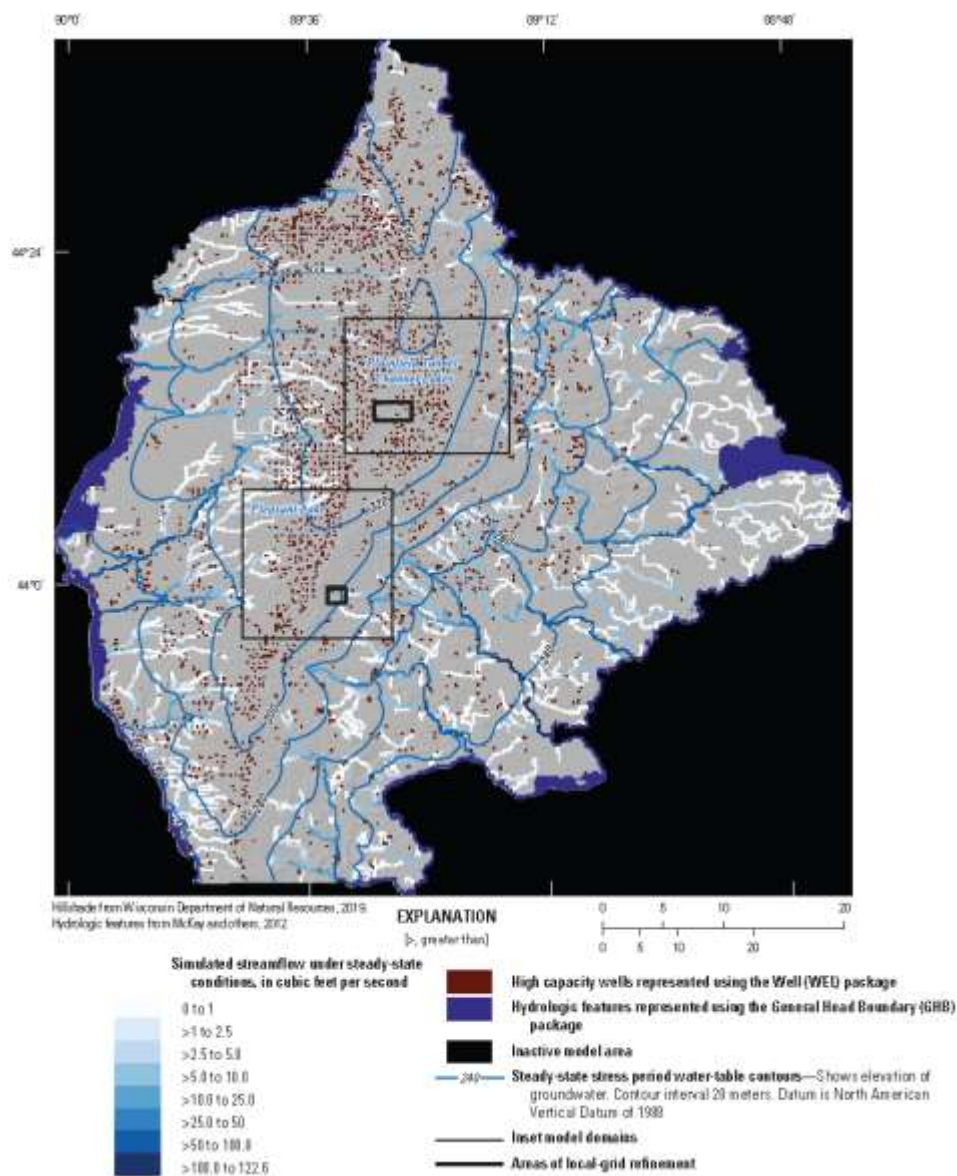
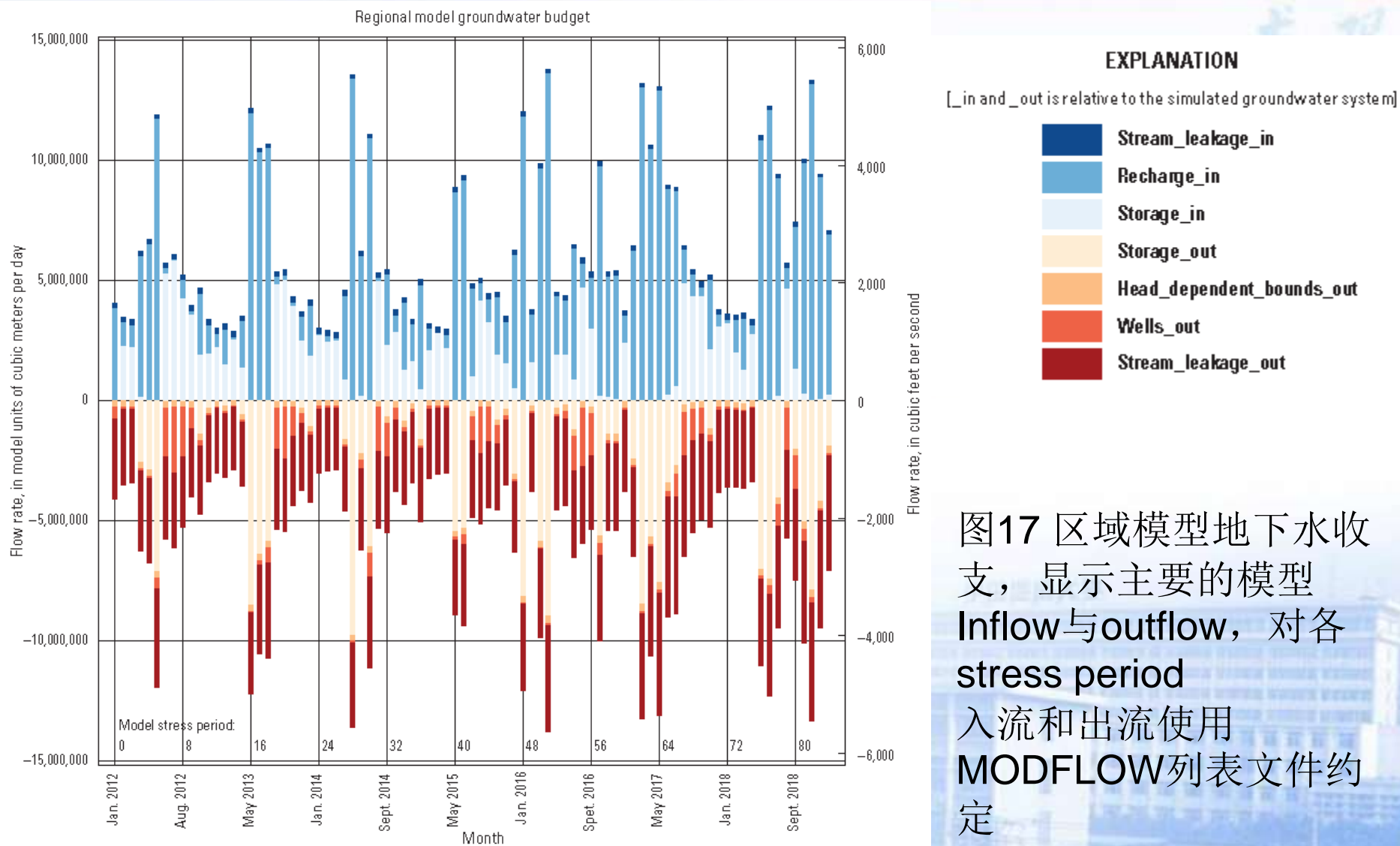


图16 在恒定态stress period内模拟的水位线和河流流量，表征2012~2018年的平均情况





中國地質大學
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

温家宝

艰苦朴素
求真务实
温家宝

重点区域的inset模型（嵌套模型）

中国地质大学



嵌套模型区域和水平向离散

湖泊周围区域使用**20m**水平网格分辨率可充分表征细节地形和湖泊的海岸线几何形状。但这样嵌套模型的运行时间很长（数个小时）。

因此，使用**LGR**方法，使用**MODFLOW6**的多中模型功能。重点研究湖泊的模型由**2**个子模型组成：

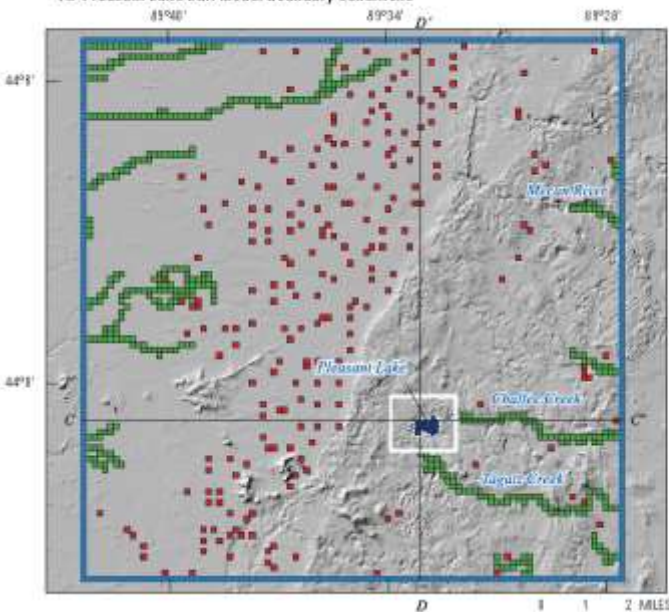
inset模型，与区域模型网格平行，相同的网格分辨率**200m**

一个局部细化的**LGR**子模型，使用均匀的**20m**网格分辨率，包围湖泊的矩形区域。**Pleasant**湖见图19.

Pleasant湖嵌套子模型由**100**行和**100**列网格组成，**LGR**模型包含**100**行和**120**列。



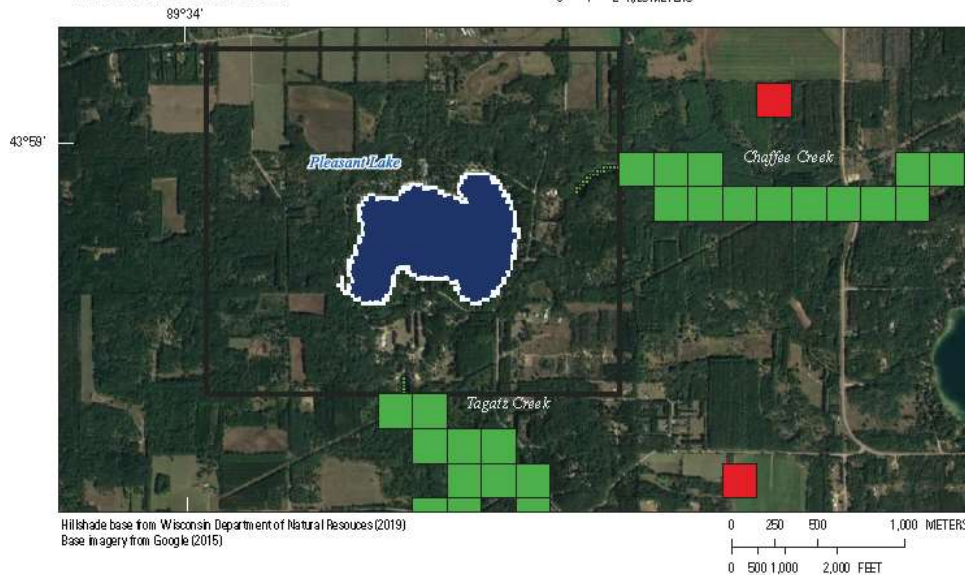
A. Pleasant Lake LGR model boundary conditions



EXPLANATION

- Local grid extent
- Specified I
- Wells
- Streamline reaches
- Lake cone
- Littoral zone
- Profoundal
- Cross-section (fig. 20)

B. LGR insert focused on lake



湖泊周围区域使用20m水平网格分辨率可充分表征细节地形和湖泊的海岸线几何形状。但这样嵌套模型的运行时间很长（数个小时）。

因此，使用LGR方法，使用MODFLOW6的多中模型功能。重点研究湖泊的模型由2个子模型组成：

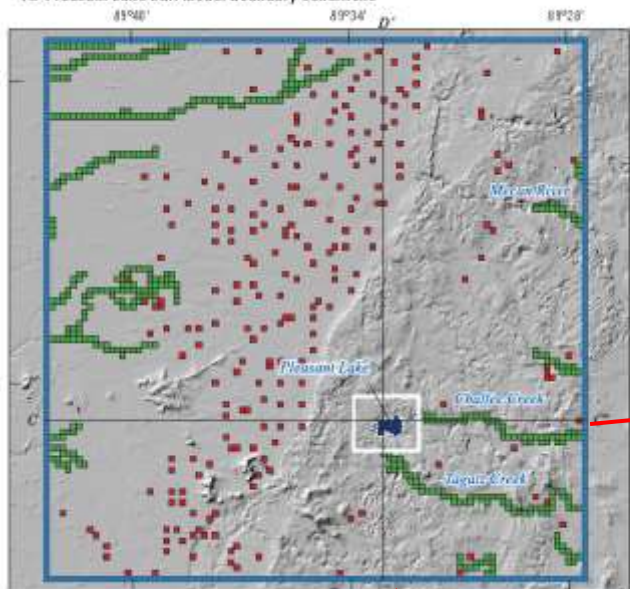
inset模型，与区域模型网格平行，相同的网格分辨率200m

一个局部细化的LGR子模型，使用均匀的20m网格分辨率，包围湖泊的矩形区域。

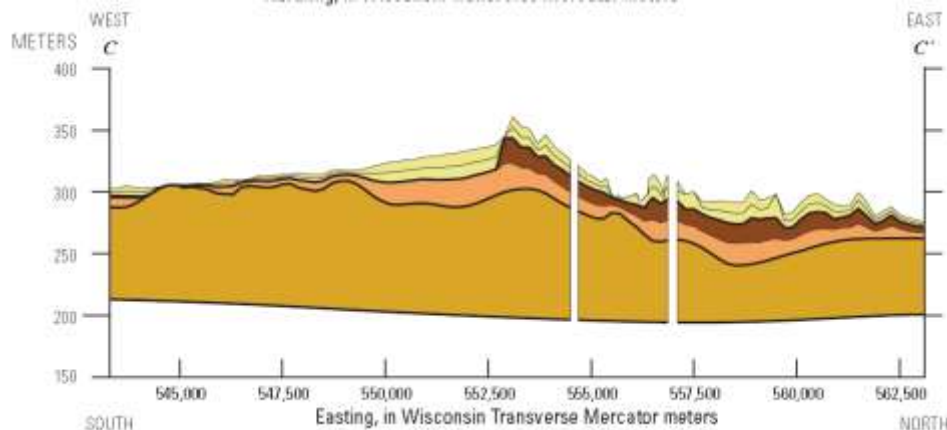
Pleasant湖嵌套子模型由100行和100列网格组成，LGR模型包含100行和120列。这样基准运行时间约10分钟。



A. Pleasant Lake LGR model boundary conditions



- EXPLANATION
(LGR, local grid ref.)
- Local grid extent
 - Specified in
 - Wells
 - Streamline reaches
 - Lake connec
 - Littoral zone
 - Profoundal
 - Cross-section (fig. 20)

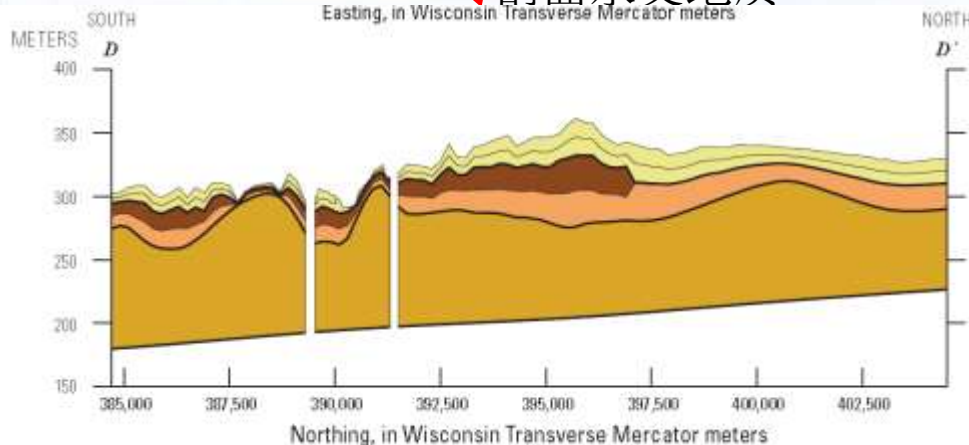


EXPLANATION

[WDNR, Wisconsin Department of Natural Resources]

- Upper glacial
- New Rome Member of Big Flats Formation or layer 2 (WDNR, 2021, app. 1)
- Lower glacial
- Sandstone bedrock
- Layer surface in regional model

剖面水文地质



垂向放大了!



嵌套模型垂向分层

inset模型的垂向分层与区域模型的数据源相同，除了**layer1**分为2层，调整为湖泊地形。模型顶层（**layer1**顶部）基于从LiDAR DEM的重采样的平均高程赋给各单元，除了湖泊地形。湖泊地形是从DEM高程减去，实现模型顶部。**inset**模型的底部表面层，没有湖泊。**Layer1**和**Layer2**均分，更好地表征湖泊水面附近的水力梯度。

MODFLOW6允许不连续分层，意味着模型残垣可以从没有水文地质单元的去删去。**Pleasant**湖嵌套模型，单元从**layer3**删去，此处没有**New Rome Member**或**Layer2**。单元也从陆地下面1m内的地层删去，接近基岩表面的点或沿着湖泊底部。



时间离散

嵌套模型的时间离散与区域模型一致，除了初始恒定态期间表征从**2012~2015**的平均条件。

嵌套模型的时间步长是**1.2**，与区域模型的**1.5**不同，因为嵌套模型更难收敛，较小的时间乘子改善模型收敛。



边界条件

嵌套模型的边界条件包括区域地下水流过模型周长。来自降雨、融雪和灌溉的补水。来自湖泊和河流的地下水-地表水交互。模型周长边界模拟为指定水头值（从区域模型获得）。



补水

嵌套模型的补水是来自**SWB**模拟的净渗流，使用最邻近方法施加到模型单元中心。该方法质量守恒。**2012~2015**施加初始恒定态周期的补水，然后在月**stress period**施加月平均净渗流。

MODFLOW6使用**Recharge (RCH)**软件模拟补水，使用基于数组的输入。

河流

MODFLOW6使用**SFR**软件模拟河流。**SFR**输入使用与区域模型相同的方法，除了使用**flowline**更精确地表征河流水源处的泉水（图19）。**Pleasant**湖模型，嵌套子模型中的泉水流出，这些溪流在2个子模型间连接，使用**Water Mover (MVR)**软件。



湖泊

MODFLOW6使用**LAK**软件描述嵌套模型中的**LGR**部分，耦合湖水平衡与地下水模型的湖水位模拟。**Pleasant**湖模型使用**LAK**软件，所有嵌套模型中的其他湖泊都使用高水力传导度区域，与区域父模型一样。

湖泊范围从遥感数据获取，与模型网格相交，表述为湖泊联系的单元。在湖泊范围内，模型顶部设置为湖底，基于地形表面。

LAK软件的水平衡需要湖泊的直接降雨输入和湖面蒸发。降雨从。。。获取，同时还包含平均气温评估。平均月湖面蒸发速率使用**Hamon**方法基于气温评估得到。



水利用

在2012~2018期间的井操作在MODFLOW6中表述为WEL软件。抽水井的位置见图19 (Pleasant湖模型)。WEL软件的输入从报告的抽水数据获得，与区域模型使用相同的方法。井分配带模型层，在井之间使用最高的传导度。没有间距信息的水井，在其位置上分配给最高的传导度。

含水层特性

水平向和垂向水力传导度初始值设置根据区域模型的率定给出。

Specific Storage(Ss)初始设置为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$

Specific yield (Sy)初始设置为0.15（无量纲）